

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA

---

19, 20 E 21 DE JUNHO DE 2018



# ACTAS

## 5<sup>as</sup>. JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

---

19, 20 E 21 DE JUNHO DE 2018

Lisboa

**Título** – Actas das 5.<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica

**Autor** – Instituto Hidrográfico

**Tiragem** – 70 exemplares

**Edição e paginação** – Instituto Hidrográfico, 2018

**Impressão e acabamento** – ACDPRINT, S.A.

**ISBN** – 978-989-705-128-9

**Depósito Legal** – 441477/18

# Índice

<b>I. Comissões</b>	<b>9</b>
Honra, Científica e Organizadora	
<b>II. Patrocinadores e Apoios</b>	<b>11</b>
<b>III. Nota Introdutória</b>	<b>15</b>
<b>IV. Resumos Alargados</b>	<b>17</b>
<b>HIDROGRAFIA</b>	
Estimation of coastal bathymetry from wave parameters retrieved with Synthetic Aperture Radar Data Luisa Lamas, José Paulo Pinto, Pedro Vilar, Ana Moura	<b>21</b>
Operacionalização de metodologias para a extração de batimetria a partir de dados de deteção remota Pedro Vilar, Luísa Lamas, Ana Moura	<b>25</b>
An approximation to a common Iberian Vertical Datum Surface Salvador Espinosa, José Ramón Torres	<b>29</b>
Geração de Modelo Digital de Superfície a partir de imagens adquiridas por VANT Sónia Godinho, Alexandre Carvalho, João Carvalho, João Gaspar, Paulo Nunes	<b>33</b>
Uma nova técnica para determinar a batimetria intertidal com imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2 João Catalão	<b>37</b>
Co-ReSyf SAR-bathymetry application: algorithm testing and performance Francisco Sancho, Florent Birrien, Alberto Azevedo	<b>41</b>
Melhoria da eficiência no processamento de dados batimétricos P. Carvalho, T. Geraldês Dias, Cristina Monteiro, Carlos R. V. Marques	<b>45</b>
Produtos <i>Satellite Derived Bathymetry</i> no apoio à decisão às operações de remoção do navio ‘Betanzos’ Pedro Vilar, Rui Guerreiro, Ana Moura, Cristina Monteiro, Carlos Videira Marques	<b>49</b>
Construção de Implantações Gráficas em AutoCAD Civil Metric 3D Cristina Monteiro, Paulo T. Carvalho, Carlos R. V. Marques, Geraldês Dias	<b>53</b>
No caminho de uma nova S-44, reestruturação dos “IHO Standards for Hydrographic Surveys” Cristina Monteiro, Carlos R. V. Marques, Nickolás Roscher, Rodrigo Carvalho	<b>57</b>
Batimetria do rio Guadiana, um património natural navegável Ana Nunes, Carlos R. V. Marques	<b>61</b>
Nearshore bathymetry from surfcam images: a new depth inversion technique Umberto Andriolo, Alberto Azevedo, Rui Taborda, Diogo Mendes, Elena Sanchez-García	<b>65</b>
Trabalhos hidrográficos no IH, da necessidade ao produto cartográfico final Carlos R. V. Marques, Cristina Monteiro	<b>69</b>
Controlo de qualidade e validação dos dados na produção de cartografia náutica Isabel Patriarca, Américo Alves, Antonieta José, Isabel Fortes, Paula Sanches	<b>73</b>
Utilização de imagens multiespectrais no apoio a obras marítimas: reforço do cordão dunar da Ilha de Tavira/Praia do Barril Isabel Patriarca, Américo Alves, Antonieta José, Isabel Fortes, Paula Sanches	<b>77</b>
<b>NAVEGAÇÃO</b>	
Avaliação de desempenho do posicionamento preciso pontual com GNSS, em modo cinemático Américo Alves, João Marreiros, Virgílio Mendes	<b>83</b>
A derivação de batimetria por satélite no apoio à decisão - Aplicação ao planeamento das operações do N.R.P. Rio Minho Rui Guerreiro, João Catalão, Isabel Bué	<b>87</b>

- 91** Effect of speed and depth variation on the interaction between two ships  
Francisco Pedro, João Alfredo Santos, Liliana Pinheiro, Conceição Fortes, Miguel Hinostroza
- 95** SWAMS: novos desenvolvimentos  
Liliana Pinheiro, Pedro Lopes, P. Poseiro, Conceição Fortes, João Alfredo Santos
- OCEANOGRAFIA OPERACIONAL**
- 101** Método de previsão sonar operacional  
Pedro Vale Marques, Carlos Lopes da Costa
- 105** OPENCoastS.pt - Serviço de previsão em tempo real a pedido para a circulação na ZEE portuguesa  
Alberto Azevedo, André Fortunato, Joana Teixeira, João Rogeiro, Anabela Oliveira, Marta Rodrigues, Jorge Gomes, Mário David, João Pina
- 109** Rede Maregráfica da Direção-Geral do Território  
Ana Medeiro, Helena Ribeiro, Maria Manuela Vasconcelos, Ana Carla Bernardes
- 113** OBSERVA.PT - Observações a bordo de navios comerciais nacionais nos ecossistemas do Mar Português\*  
A. Miguel P. Santos, Nuno Lourenço, Anabela Carvalho, I. Sousa Pinto, A. Oliveira
- 117** The role of high-resolution oil spill response models in emergency scenarios, The ATLANTIC POLEX.PT 2017 example  
Flávio Martins, João Janeiro
- 121** Downscaling CMEMS IBI 3D hourly solution  
Paulo Leitão, Adélio Silva, João Rodrigues, Sofia Bartolomeu, José Leitão
- 125** Challenges for sustainable monitoring and evaluation of the EU marine strategy framework directive in the Atlantic offshore waters: the iFADO project  
Francisco Campuzano, Mariangel Garcia, Tomasz Dabrowski, Steve Groom, Manuel Ruiz Villarreal, Vanda Brotas, Manfred Kaufmann, Susan Hartman, Paulo Oliveira, Ana Martins, Manuela Juliano, Fábio Vieira, Muriel Lux, Carlos Barrera, Xavier Rebour, Ana Paula Simão, Ramiro Neves
- 128** Multinational Response and Preparedness to Oil and Chemical Spills  
Lígia Pinto, Rodrigo Fernandes, João Sobrinho, S. Le Floch, Rui Caldeira, C. C. Sanchez, X. Reminez, S. Benbrahim, Ramiro Neves
- 132** Serviços de previsão para suporte a estabelecimentos de culturas marinhas  
Sofia Bartolomeu, José Leitão, João Rodrigues, Paulo Leitão, Adélio Silva
- 136** Technical improvements for AUV's in SWARMS  
Daniel A. Real-Arce, Carlos Barrera, T. Morales, J. Hernández and O. Llinás for the SWARMS consortium
- 140** Improving monitoring capabilities in the Macaronesian region with ocean gliders  
Carlos Barrera, Rui Caldeira, Christoph Waldmann, Maria Jose Rueda, Joaquin Hernández, Octavio Llinas
- OCEANOGRAFIA FÍSICA**
- 147** Estudo de correntes e massas de água no espaço marítimo português: Utilização de software e de climatologia  
Nádia Nogueira Marques, Carlos Lopes da Costa
- 151** Assessment of sea surface temperature estimates near the coast off SW Portugal  
Paulo Oliveira, Mariana Santos, Teresa Moita, Ana Amorim
- 155** Geração de Maré Interna na Cadeia Vitória-Trindade  
Simone Camargo, Afonso Paiva
- 159** Interação Atmosfera-Oceano num sistema de afloramento costeiro  
José Alves, Álvaro Peliz, Rui Caldeira, Pedro Miranda
- 163** Agitação marítima em Portugal continental nos dias 18 e 19 de Janeiro de 2018  
Bruno Café, Ricardo Tavares

Climatologia das águas da Zona Económica Exclusiva De Angola Enoque Vasco, Jesus Dubert, Maria Rita Nolasco, N. Cordeiro, Paulo Relvas	<b>167</b>
Regimes de transporte costeiro na margem sul da ilha da Madeira Jesus Reis, Gustavo Silva, Cátia Azevedo, Rui Caldeira	<b>171</b>
Formação de 'salt-fingers' na esteira da ilha da Madeira Cátia Azevedo, Carolina Camargo, Rui Caldeira	<b>175</b>
Uma comparação de métodos para análise de registos de marés Dora Carinhas, Paulo Infante	<b>179</b>
Vórtices na região oceânica de Cabo Frio, RJ - Brasil Daniela Corrêa, Guilherme Nogueira Mill, Valdimir S. Costa	<b>183</b>
Variabilidade espacial e sazonal da agitação marítima na proximidade da zona de rebentação no arco litoral Caparica-Espichel Francisco Sancho, Maria João Banha, Maria da Graça Neves	<b>186</b>
Análise da variabilidade relativa do nível do mar para a região do Algarve Fábio Madeira, Carlos Antunes	<b>190</b>
Relationship between the mean periods of wind-generated and infragravity waves: a sensitivity analysis Diogo Mendes, António Pires-Silva, Paulo Pinto, André Fortunato	<b>194</b>
Bound and free infragravity waves over a bar Diogo Mendes, Paulo Pinto, António Pires-Silva, André Fortunato	<b>198</b>
Field observations of nonlinear wave parameters on a rocky platform João Machado, Diogo Mendes, António Pires-Silva	<b>202</b>
Water quality, morpho-sedimentary and hydrodynamical evolution of the Douro River estuary Isabel Iglesias, Ana Bio, Helena Granja, Ana Paula Mucha, Ana Luísa Costa, Luísa Bastos	<b>206</b>
Western Iberia sea surface salinity patterns due to land inputs Francisco Campuzano, Manuela Juliano, Maria Manuel Angélico, Paulo Oliveira, Ramiro Neves	<b>210</b>
Measuring wave breaking height from video: a novel methodology applied to surfcam images Umberto Andriolo, Rui Taborda, Diogo Mendes, Elena Sanchez Garcia	<b>214</b>
First evidences of internal wave activity in the SE of Madeira Island Rui Caldeira, Miguel Bruno, Jesus Reis, Juan Gomiz-Pascual, R. Vieira, Gabriel Navarro	<b>218</b>
Extreme wave height events in Algarve (Portugal): comparison between HF radar systems and wave buoys Maria Fernandes, Carlos Fernandes, Teotónio Barroqueiro, Pedro Agostinho, Nelson Martins, Andrés Alonso-Martirena	<b>222</b>
Renaturalização da Zona do Lugar de Baixo, Madeira João Castro, Ana Mendonça, Conceição J.E.M. Fortes	<b>226</b>
<b>OCEANOGRAFIA GEOLÓGICA</b>	
Variabilidade textural e composicional das partículas em suspensão durante um ciclo de maré - Estuário do Tejo Rita Santos, Ana Isabel Santos, Anabela Oliveira	<b>233</b>
Análise das mudanças geomorfológicas na cabeceira do canhão submarino de Monterey, Califórnia, entre 2002 e 2015 Renato Moraes	<b>237</b>
Suspended sediments and water masses in the Madeira shelf Anabela Oliveira, Ana Isabel Santos, Nuno Zacarias, Luís Melo	<b>241</b>
Dinâmica sedimentar e evolução a longo prazo do porto da Praia, Ilha de Santiago, Cabo Verde Luís Portela	<b>245</b>

- 249** Linha de costa: da deteção por imagens de satélite à modelação a longo prazo  
Soraia Teixeira, Francisco Sancho, António Trigo-Teixeira
- 253** Taxas de acumulação sedimentar no porto de pesca da Nazaré  
Luís Portela
- 257** Modelling the beach morphodynamics in defence schemes of combined groyne fields and seawalls under storm conditions  
João Nuno Oliveira, Filipa Oliveira, António Trigo-Teixeira
- 261** Grain-size selective longshore transport at a headland-bay beach: insights from a sediment tracer experiment  
Mónica Ribeiro, Rui Taborda, João Duarte, Aurora Rodrigues
- 265** Modelling of a dredging scenario under winter wave climate for Figueira da Foz coastal system (W Portugal)  
Sandra Fernández-Fernández, Caroline Ferreira, Paulo Silva, Paulo Baptista, Carlos Coelho, Soraia Romão, Ângela Fontán-Bouzas, Cristina Bernardes, Tiago Abreu
- 269** Impactos da depressão *Emma* no litoral da região de Lisboa  
Andreia Ferreira, Ana Bastos, Ana Nobre Silva, Rui Taborda, César Andrade
- 273** Monitoring the implementation of a dredging plan in the Óbidos Lagoon, (Portugal)  
Paula Freire, André Fortunato, Luís Portela, Alberto Azevedo
- 277** Análise Morfológica e dos Fluxos Sedimentares no Canal De Acesso da Desembocadura Sul da Baía de Paranaguá, Brasil  
Guilherme Cruz, A. M. Noernberg
- 281** Bathymetry of the lower Douro estuary before and after breakwater construction  
João Pinheiro, José Alberto Gonçalves, Américo Magalhães, Luísa Bastos, Isabel Iglesias, Ana Bio
- 285** Morphodynamics in the vicinity of a groyne with 2D and 1D numerical models  
Filipa Oliveira, Joana Ruas, António Trigo-Teixeira
- 289** Statistical tools to understand ADCP backscatter response to suspended sediment attribute variations  
Ana Isabel Santos, Dora Carinhas, Anabela Oliveira
- 293** Assessing the evolution of platform beaches: challenges and advancements  
Cristina Ponte Lira, Ana Nobre Silva, Rui Taborda, César Andrade, Mafalda Carapuço, Maria João Faria
- 297** Caracterização sonográfica e geomorfológica através de um levantamento interferométrico no Canal da Barra da Lagoa (Florianópolis - SC - Brasil)  
Daniel Carazzai, Antônio H.F. Klein, Cristina Monteiro, Carlos R.V. Marques

## OCEANOGRAFIA QUÍMICA

- 303** Monitorização de metais em sedimentos: Abordagens de avaliação da incerteza de medição  
Vanessa Morgado, Carla Palma, Ricardo B. Silva
- 307** Qualidade da água no baixo estuário do rio Arade - comparação verão versus inverno seco  
Cátia Correia, Alexandra Rosa, Alexandra Cravo, José Jacob
- 311** Otimização da incerteza da amostragem do Rio Tejo para a deteção de episódios de poluição  
Carlos Borges, Ricardo B. Silva, Carla Palma
- 315** Pollutants of recent concern in coastal areas - methods and levels  
Nuno Ratola, Filipe Rocha, Daniela Capela, Vera Homem, Pedro Jiménez-Guerrero, Javier Castro Jiménez, A. Alves
- 318** Validação da determinação de compostos organoclorados em solos por cromatografia de fase gasosa com detetor de captura de eletrões  
Paula Santos, Ana Catarina Rocha, Ricardo Silva, Carla Palma
- 322** One Year Monitoring of Water Characteristics Inside Ria Formosa  
José Jacob, Alexandra Cravo, Alexandra Rosa, Marta Rodrigues, João Rogeiro

Calibração de amostradores passivos monofásicos para a monitorização marinha de contaminantes orgânicos hidrofóbicos: uma revisão bibliográfica Ana Mendonça, Ana Catarina Rocha, Paula Santos, Carla Palma	<b>326</b>
Problemas ambientais relacionados com a dragagem de sedimentos poluídos Rita Fonseca, Carla Palma	<b>330</b>
<b>GEOLOGIA MARINHA</b>	
Bottom sediments mineralogical and textural variability in the Madeira shelf Anabela Oliveira, Ana Santos, Silas Cunha	<b>337</b>
Caracterização geológica e morfológica da plataforma continental entre Sines e a praia de São Torpes Frederico Ferreira, Laura Reis, Sandra Silva	<b>341</b>
Efeito da maré em sedimentos silto-argilosos: Estuário do Tejo Rita Santos, Anabela Oliveira, Ana Santos	<b>345</b>
Resultados preliminares do mapeamento de anomalias magnéticas na plataforma da Ilha de Santa Maria (Açores) Sandra Silva, Pedro Silva, Rui Quartau, André Vinhas, Ricardo Ramalho	<b>349</b>
Mineralogy and geochemistry of lucky strike hydrothermal rocks, 37°N on the Mid Atlantic Ridge Pedro Ferreira, Carlos Inverno, Álvaro Pinto, Fernanda Guimarães, Rogério Calvo, J. Hipólito Monteiro	<b>353</b>
A herança geológica na cabeceira do canhão de Aveiro Nuno Lapa, Aurora Rodrigues, Fernando Marques, André Vinhas	<b>357</b>
Caracterização da cobertura recente da plataforma continental ao largo de Sesimbra: primeiros resultados André Vinhas, Aurora Rodrigues, Nuno Pimentel	<b>361</b>
The submarine morphology of the Selvagens Islands Rúben Santos, Rui Quartau, Aurora Rodrigues	<b>365</b>
The morphology of Santa Maria Island shelf: Preliminary results from the PLATMAR project Rui Quartau, Alessandro Ricchi, Ricardo Ramalho, João Cruz, Catarina Fradique, André Vinhas	<b>369</b>
Implementation of a methodology for elemental analysis of sediments based on a handheld X-ray fluorescence analyzer João Duarte, Sandra Moreira, Joaquim Pombo	<b>373</b>
Variações morfológicas recentes da zona submersa do Portinho da Arrábida Luís Rebêlo, Sílvia Nave	<b>377</b>
Review on the application of geostatistical techniques to predict maritime variables Marisa Pinheiro, Tiago Miranda, Eduardo Pereira, Isabel Valente, Fábio Cruz, Dmytro Maslov	<b>381</b>
<b>SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA &amp; GESTÃO DE DADOS</b>	
Base de dados do oceano - caracterização oceanográfica da região do Atlântico Noroeste Mariana Limpinho, Carlos L. da Costa	<b>387</b>
ODYSSEA - Operating a network of integrated observatory systems in the Mediterranean Sea Carlos Figueiredo, Inês Pedro, Adélio Silva, Pedro Galvão, Paulo Leitão	<b>391</b>
O Compromisso INSPIRE - Contribuição da Oceanografia no Hidrográfico Sara Almeida, Sónia Godinho, António Martinho	<b>395</b>
Compilação de dados geológicos da plataforma continental portuguesa Cecília Isabel Luz, Ana Saramago, Aurora Rodrigues	<b>397</b>
O Sistema Nacional de Informação Geográfica e a implementação da Diretiva INSPIRE em Portugal: situação atual e evolução prevista Paulo Patrício, Danilo Furtado, Henrique Silva, Vanda Bica, Alexandra Fonseca, Ana Luísa Gomes, André Serronha, Mário Caetano	<b>401</b>



- 404** IPSentinel - Infraestrutura portuguesa para armazenamento e disponibilização de imagens Sentinel  
Marisa Silva, Paulo Patrício, Bruno Anjos, Marco Silva, Cristina Pimentel, Inês Girão, Mário Caetano
- 408** Análise multicritério para apoio à decisão em intervenções de obras marítimo-portuárias: estudo de quebra-mares de talude  
Rodrigo Giollo, Maria João Silva, Rute Lemos, Paula Couto
- 412** Nova metodologia de validação dos dados das Estações Meteorológicas  
Margarida Alves, Sara Almeida, António da Silva
- 416** Implementação da Diretiva INSPIRE no tema Toponímia  
André Serronha, Francisco Caldeira, Alexandra Morgado
- 420** Hidrográfico+ : O processo de evolução da infraestrutura de dados espaciais marinhos do Instituto Hidrográfico  
Paulo Nunes, Armando Correia, Sónia Godinho, Isabel Cruz
- 424** As tendências das infraestruturas europeias de dados marinhos  
Paulo Nunes, Ana Saramago, Carlos Borges, Leonor Veiga, Sara Almeida
- 428** Estudo da vulnerabilidade costeira à subida do nível médio do mar para Portugal Continental como consequência das alterações climáticas  
Carolina Rocha, Carlos Antunes, Cristina Catita
- 432** Desenvolvimento de um portal de dados do ambiente marinho  
Ana Raquel Melo, Rúben Santos, Aurora Rodrigues, João Catalão
- 436** Plataforma de observações para avaliação de riscos costeiros e efeitos ambientais  
Alexandre Costa, Lino Oliveira, Artur Rocha
- 440** Sistema geoespacial para planeamento e apoio à decisão na navegação em águas restritas  
Afonso Chanoca Ferreira, Alexandra Morgado, Paulo Nunes, Anacleto Correia

#### **TECNOLOGIAS DO MAR E ENGENHARIA OCEANOGRÁFICA**

- 447** Análise das forças num emissário submarino utilizando um modelo numérico 3D RANS VoF  
Eric Didier, Maria Graça Neves, Paulo Teixeira
- 451** Caracterização geotécnica para roteamento de cabos. Caso de estudo: cabo elétrico entre as ilhas da Madeira e de Porto Santo  
Joaquim Pombo, Aurora Rodrigues, Nuno Lapa
- 455** Galgamento em estruturas de proteção marginal face à subida de nível do mar  
Diogo Pires, Maria Graça Neves, Filipa Oliveira
- 459** Increase the Autonomy of Oceanographic Monitoring Stations with a Submersible Energy Harvester  
C.L. Faria, L.M. Goncalves, R. Lima e M.S. Martins
- 462** Estudo de dependência de malha em simulações numéricas de hidrodinâmica utilizando o código OpenFOAM  
José Conde
- 466** Systematic Observation of Maritime Works. The New OSOM+  
Rui Capitão, Rute Lemos, Maria João Henriques, Juana Fortes, Maria Graça Neves, Luís Silva, Maria Teresa Reis
- 470** Influence of wave conditions in damages at scale model tests of rubble-mound breakwaters under sea level rising  
Rute Lemos, Conceição Fortes, Ana Mendonça, André Ramos, Maria Graça Neves, Rui Capitão, Maria Teresa Reis
- 474** Estudos de Agitação e Ressonância no Porto de Leixões  
Conceição Fortes, Liliana Pinheiro, Maria Graça Neves, Rui Capitão, Hugo Lopes
- 478** NEREIDE: Operacionalização da investigação científica em ambiente costeiro e de plataforma pelo CESAM  
Ivana Bosnic e Eduardo Petrini
- 481** Levantamento de dados usando múltiplos veículos autónomos: Estratégias e Resultados  
José Pinto, João Sousa
- 485** [Índice de autores](#)

# Comissões

## COMISSÃO DE HONRA

Ministro da Defesa Nacional, *Prof. Doutor José Alberto Azeredo Lopes*  
 Ministro da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, *Prof. Doutor Manuel Heitor*  
 Ministro do Ambiente, *Eng.º João Pedro Matos Fernandes*  
 Ministra do Mar, *Eng.ª Ana Paula Vitorino*  
 Presidente da Câmara Municipal de Lisboa, *Dr. Fernando Medina*  
 Presidente da Câmara Municipal do Seixal, *Eng.º Joaquim Santos*  
 Chefe do Estado-Maior da Armada, *Almirante António Mendes Calado*  
 Diretor-geral do IH, *Contra-almirante António Manuel de C. Coelho Cândido*  
 Bastonário da Ordem dos Engenheiros, *Eng.º Carlos Mineiro Aires*  
 Reitor da Universidade de Lisboa, *Prof. Doutor António Cruz Serra*  
 Reitor da Universidade Nova de Lisboa, *Prof. Doutor João Sâáguas*  
 Reitor da Universidade do Porto, *Prof. Doutor Sebastião Feyo de Azevedo*  
 Reitor da Universidade de Aveiro, *Prof. Doutor Manuel António Assunção*  
 Reitor da Universidade dos Açores, *Prof. Doutor João Luís Gaspar*  
 Reitor da Universidade da Madeira, *Prof. Doutor José Molarinho Carmo*  
 Reitor da Universidade do Algarve, *Prof. Doutor Pedro Águas*  
 Presidente da Academia de Marinha, *Almirante Francisco Vidal Abreu*  
 Presidente do Comité Português para a Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO,  
*Prof. Doutor Luis Menezes Pinheiro*  
 Presidente da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, *Prof. Doutor Paulo Ferrão*  
 Presidente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *Eng.º Carlos Pina*  
 Presidente do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, *Prof. Doutor Miguel Miranda*  
 Presidente do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, *Eng.ª Teresa Ponce de Leão*  
 Diretor da Comissão Cultural de Marinha, *Vice-almirante Augusto Mourão Ezequiel*  
 Comandante da Escola Naval, *Contra-almirante Mário Simões Marques*  
 Presidente da Fórum Oceano, *Prof. Doutor António Nogueira Leite*

## COMISSÃO CIENTÍFICA

*Doutor José Paulo Pinto, Marinha, IH (presidente)*  
*Doutora Anabela Campos Oliveira, Marinha, IH*  
*Engenheira Ana Leonor Veiga, Marinha, IH*  
*Doutora Ana Lillebø, UA, CESAM*  
*Doutor André Fortunato, LNEG*  
*Professor Doutor António Pires Silva, IST*  
*Capitão-de fragata Engenheiro Hidrógrafo António Santos Martinho, Marinha, IH*  
*Doutora Aurora Rodrigues Bizarro, Marinha, IH*  
*Doutora Carla Maria Palma, Marinha, IH*  
*Professor Doutor Carlos Antunes, FCUL*  
*Contra-almirante Engenheiro Hidrógrafo Carlos Ventura Soares, AMN, DGAM*  
*Capitão-tenente Engenheiro Hidrógrafo Carlos Videira Marques, Marinha, IH*  
*Professora Doutora Cristina Catita, FCUL*  
*Capitão-de-mar-e-guerra Engenheiro Hidrógrafo Fernando Freitas Artilheiro, AMN, DF*  
*Doutor João Cascalho, FCUL*  
*Professor Doutor João Catalão Fernandes, FCUL*  
*Professor Doutor João Tasso de Sousa, FEUP*  
*Professor Doutor Joaquim Dias, FCUL, MARE*  
*Doutor Joaquim Pombo, Marinha, IH*  
*Capitão-de fragata Jorge Santos Teles, Marinha, IH*  
*Professor Doutor José Brito Jacob, UAIG*  
*Capitão-de-mar-e-guerra Engenheiro Hidrógrafo Leonel Pereira Manteigas, Marinha, IH*  
*Doutor Luis Correia Rebelo, LNEG*  
*Primeiro-tenente Oceanógrafo Luís Quaresma dos Santos, Marinha, IH*  
*Capitão-de-mar-e-guerra Luís Sardinha Monteiro, Marinha*  
*Professora Doutora Maria João Bebiano, UAIG*  
*Professora Doutora Maria Luísa Bastos, FCUP, CIIMAR*  
*Professor Doutor Mário Caetano, DGT*  
*Doutor Miguel Caetano, IPMA*  
*Doutor Miguel Santos, IPMA*

*Capitão-tenente Hidrógrafo Paulo Antunes Nunes, Marinha, IH*  
*Professor Doutor Paulo Silva, UA, CESAM*  
*Doutor Rúben Miguel Santos, Marinha, IH*  
*Doutor Rui Quartau, Marinha, IH*  
*Professor Doutor Rui Taborda, FCUL*  
*Professor Doutor Virgílio Mendes, FCUL*

#### **COMISSÃO ORGANIZADORA**

*Capitão-de fragata Engenheiro Hidrógrafo José Mesquita Onofre (presidente)*  
*Capitão-de fragata Hidrógrafo António Albuquerque e Silva*  
*Segundo-tenente Design Bruno Boto das Neves*  
*Doutora Carla Mesquita Palma*  
*Capitão-tenente Química Isabel Salgueiro da Cruz*  
*Capitão-tenente Jorge Sousa Machado*  
*Capitão-tenente Hidrógrafo Teotónio Pires Barroqueiro*  
*Dra. Teresa Manuela Correia*

## Patrocinadores e Apoios

KONGSBERG MARITIME

MRA Instrumentação

WONDERSTATUS, LDA

TELEDYNE CARIS

QUALITAS INSTRUMENTS

Projeto MyCoast



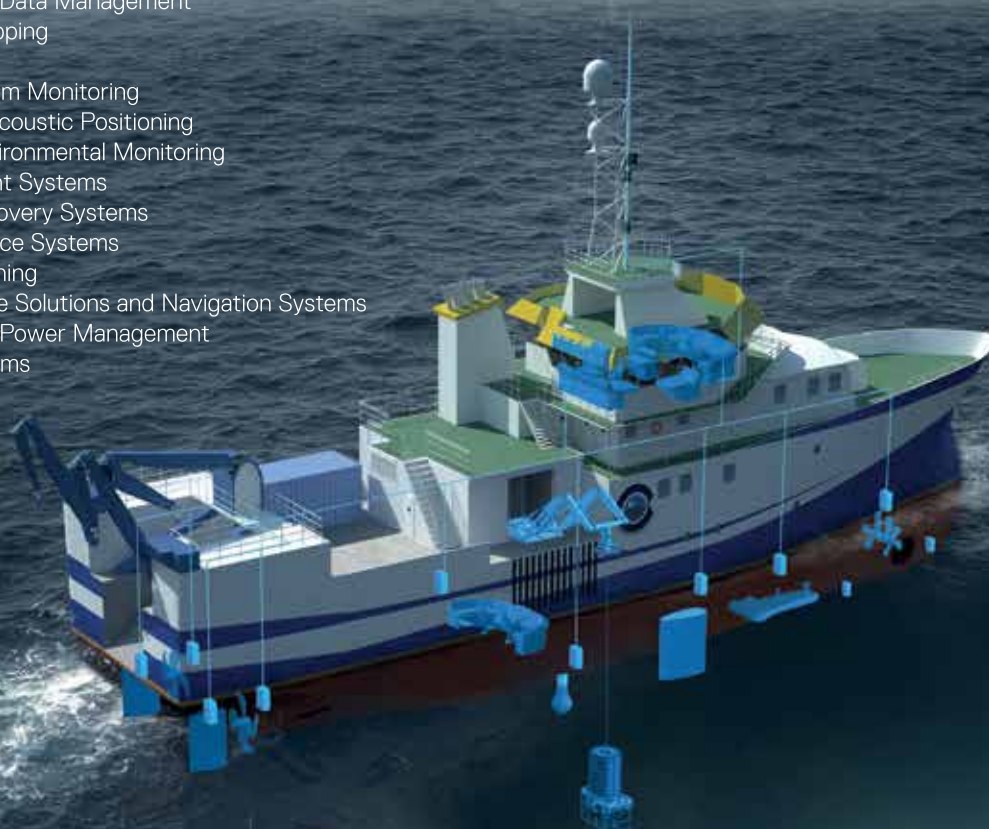


KONGSBERG

# THE FULL PICTURE FOR OCEAN SCIENCE

FULLY INTEGRATED SOLUTIONS FROM KONGSBERG MARITIME

- Automation and Data Management
- Underwater Mapping
- Marine Robotics
- Marine Ecosystem Monitoring
- High Precision Acoustic Positioning
- Underwater Environmental Monitoring
- Camera and Light Systems
- Launch and Recovery Systems
- Position Reference Systems
- Dynamic Positioning
- Integrated Bridge Solutions and Navigation Systems
- Automation and Power Management
- Simulation Systems



[km.kongsberg.com](http://km.kongsberg.com)



## Nota introdutória

Os resumos alargados reunidos neste livro resultam dos trabalhos apresentados nas 5.<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica, que decorreram em Lisboa, nas instalações do Instituto Hidrográfico, nos dias 19, 20 e 21 de junho de 2018.

O Instituto Hidrográfico, órgão da Marinha e Laboratório do Estado no âmbito das ciências e das técnicas do mar, organizou este quinto evento, na semana do Dia Mundial da Hidrografia, 21 de junho, subordinado ao tema “*Bathymetry - the foundation for sustainable seas, oceans and waterways*” (*Batimetria - o pilar para mares, oceanos e vias navegáveis sustentáveis*), assumindo-se assim como um fórum nacional de natureza científica focado nas ciências do mar.

As cerca de cento e dezasseis comunicações apresentadas, orais e pósteres, foram divididas pelas sessões de hidrografia, navegação, geologia marinha, sistemas de informação geográfica, gestão de dados do ambiente marinho, tecnologias do mar, engenharia oceanográfica e oceanografias operacional, física, geológica e química.

A quantidade e a diversidade dos trabalhos recebidos atestam o interesse desta iniciativa, não só ao nível dos técnicos e investigadores nacionais de reconhecido mérito, mas também de outros 10 países. Foi assim, possível reunir comunicações da academia, de instituições públicas, entre as quais diversos Laboratórios do Estado, de empresas e de representantes de projetos de I&D.

Em nome do Instituto Hidrográfico, agradeço a todos os envolvidos nestas 5.<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica, esperando que a experiência e os contactos proporcionados possam ter contribuído para o vosso enriquecimento pessoal, profissional e científico. Sublinho, ainda, o empenho e o entusiasmo demonstrados pelo pessoal deste Instituto envolvido na preparação do evento, em especial pela Comissão Organizadora. Relevo, também, o valioso préstimo das empresas, nacionais e estrangeiras, que quiseram colaborar com Instituto Hidrográfico na organização destas Jornadas, pois foi crucial para levar este evento a bom porto.

Desejo finalmente que o conjunto de trabalhos aqui publicados seja representativo da qualidade da produção científica nas temáticas relacionadas com Engenharia Hidrográfica, e que este evento tenha contribuído para consolidar e divulgar o trabalho realizado, diariamente, em prol das ciências e do conhecimento do mar.

Bem hajam!

O DIRETOR-GERAL



António Manuel de C. Coelho Cándido  
Contra-almirante



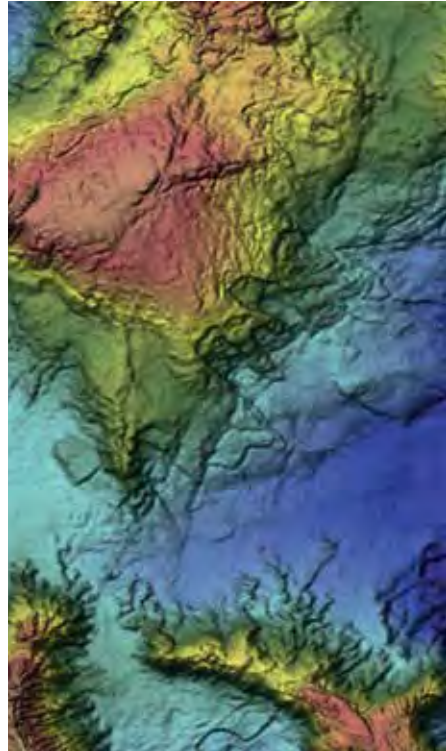


## Resumos Alargados



# HIDROGRAFIA

## 5<sup>as</sup>. JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA





# Estimation of coastal bathymetry from wave parameters retrieved with Synthetic Aperture Radar Data.

Lamas, L. (1), J. P. Pinto (1), P. Vilar (1) and A. Moura (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal. E-mail: [luisa.lamas@hidrografico.pt](mailto:luisa.lamas@hidrografico.pt)

**Abstract:** Small-scale topographic features can change relatively fast due to storms. These rapid changes are not easily measured by traditional methodologies and, therefore, methods that rely on Earth Observation are valuable for the monitoring of the coastal bathymetry.

In this study, coastal bathymetry is derived with a wave-tracking algorithm using wave parameters retrieved from Synthetic Aperture Radar (SAR) data. The algorithm tracks down the shoaling waves from the intermediate waters until the wave breaking zone and, through the linear wave dispersion relationship, estimates the water depth using the wavelength and direction. The output of the algorithm is a 2D bathymetry field that results from the interpolation of the estimated depth at each tracking point. Two case studies at different locations off the Portuguese Coast will be presented. The operational capabilities of the algorithm and the synergy between SAR and Optical data to retrieve high-resolution bathymetry in shallower waters will be discussed.

**Key words:** Coastal Bathymetry, Synthetic Aperture Radar Data, Wavelength, Wave Direction, Earth Observation

## 1 INTRODUCTION

The global bathymetry at 1 km resolution is already known and available through multiple different data sets (e.g General Bathymetric Chart of the Ocean - GEBCO\_2014 Grid - [www.gebco.net](http://www.gebco.net); hereinafter referred as GEBCO). However, small-scale shallow water topographic features, like sand banks, reefs and bars, can change frequently due to storms, and may not be correctly depicted on the nautical charts. These changes can be relatively fast and are not easily captured by traditional hydrographic surveying methodologies and, therefore, methods that rely on Earth Observation from space can be valuable for the monitoring of the coastal bathymetry.

In this study, coastal bathymetry is derived with a ray-tracing algorithm (RTA) through wave parameters retrieved from Synthetic Aperture Radar (SAR) images from the Sentinel-1 satellites, following a similar methodology as proposed by Pleskachevsky *et al.*, (2011).

The estimation of bathymetry from SAR data through this method relies on the detection of long surface gravity waves and how the wave properties are modified as they propagate towards the shore, which can be related to the bottom topography.

One of the greatest advantages of using SAR images to retrieve the underwater topography is that radar image acquisitions can occur at any time, since they are not significantly affected by meteorological conditions (e.g. clouds) and are not dependent of the sunlight, which are limitations when using multispectral images for the derivation of bathymetry. Thus, the use of satellite SAR imagery to derive the bathymetry can be particularly useful for

many coastal applications, due to their global coverage, high resolution, and daylight and weather independency.

The present work is a part of a research application developed within the EU H2020 Coastal waters Research Synergy Framework (Co-ReSyF) project, to demonstrate the operational capabilities of the platform.

Several case studies at different locations off the Portuguese Coast will be presented (Fig. 1), using high resolution SAR images from Sentinel-1.



Fig. 1. Areas of interest (AOI), Aveiro and Sines, delimited by the inset boxes.

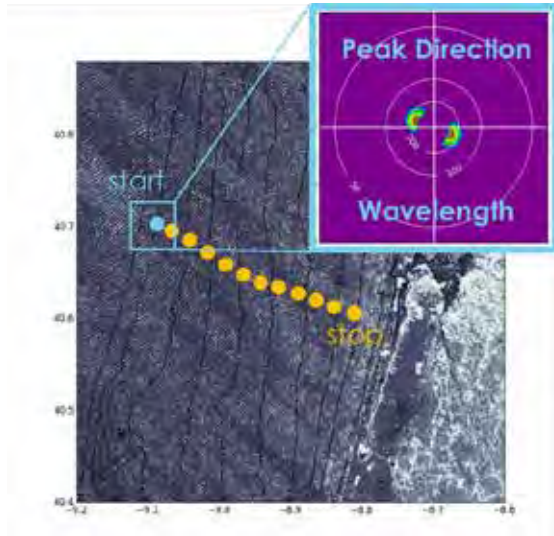


Fig. 2. SAR image (Sentinel-1A over Aveiro, Portugal) superimposed with isobaths from the reference bathymetric model (GEBCO) and an example of the tracking positions (yellow circles) in a single wave ray. Inside the blue box is the directional spectrum obtained for a 1 km<sup>2</sup> sub-image centered at the initial tracking position (blue circle).

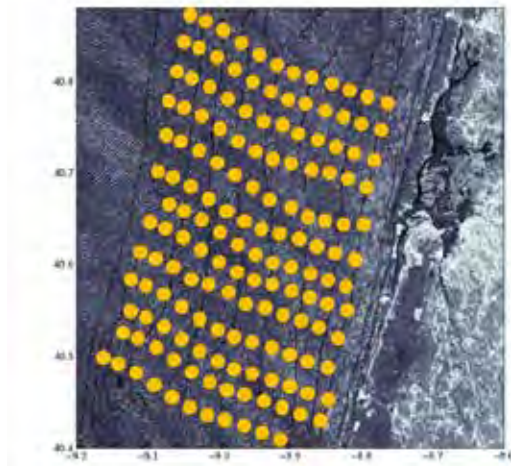


Fig. 3. Example of tracking positions for some of the wave rays traced by the algorithm for the same SAR image as Fig. 2.

## 2 DATA and METHODS

### 2.1 Synthetic Aperture Radar data

C-Band SAR data from Sentinel-1A and 1B with a pixel resolution of 10 m are used in this study. The pre-processing of the SAR images for each AOI (Aveiro and Sines) was done with the freely available software SNAP (*Sentinel Application Platform*: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>).

The processing steps consisted of sub-setting the image according to the latitude and longitude limits of each AOI, followed by a geometric ellipsoid correction with a geolocation-grid, to transform the image into WGS84 (World Geodetic System 1984) reference. Then, the image was calibrated to transform the pixel values into actual physical values of backscatter and finally a speckle filter was applied

at the end. The image was then saved into nectdf format, ready to be ingested by the algorithm (implemented in Python 2.7) for the estimation of bathymetry. All of these processing steps were automated using the Graph Builder and Batch Processing tools of SNAP, allowing for a consistent pre-processing of all SAR images.

### 2.2 Study Domain

Even though the objective of this work, in the frame of the Co-ReSyF project, is to deliver a full operational tool that will allow the computation of the coastal bathymetry anywhere in the world, the development, testing and validation of this tool is being conducted at specific locations along the Portuguese coast (Fig. 1). The coastal region around Aveiro was considered as the main setting for the development and testing of the methodology. The region around Sines was considered for the method validation and as the test case region for the development of a synergetic product that combines the coastal bathymetry derived from SAR and the littoral high-resolution bathymetry derived from multispectral data (Vilar *et al.*, 2018).

### 2.3 Wave parameters from SAR

SAR is an active remote sensor that provides two-dimensional information on the normalized radar cross-section based on the backscatter echo. In case of surface waves, the radar return echo is dominated by Bragg scattering of short ripple capillary waves, in the order of centimetres, produced by wind at sea surface (Hasselmann *et al.*, 1985). These small capillary waves are modulated by longer surface waves which will create the wave-like stripe patterns observed in SAR images. Thus, the sea surface roughness and slope, which influence the radar echo, can be measured, and a two-dimensional wave spectra can be retrieved, which will contain information on the peak direction and wavelength.

### 2.4 Bottom depth estimation

The derivation of bathymetry through wave parameters retrieved from SAR images uses the first degree (linear) dispersion relationship for shoaling waves, which relates the depth with the wave's length and frequency:

$$\omega^2 = \frac{2\pi}{L} g \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (1)$$

Where  $g = 9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  is the acceleration of gravity,  $\omega$  is the wave frequency,  $L$  is the wavelength and  $h$  is the water depth. By inverting this relationship, the depth can be derived from:

$$h(L, \omega) = \frac{L}{2\pi} \tanh^{-1}\left(\frac{\omega^2 L}{2\pi g}\right) \quad (2)$$

This relationship holds when the waves are affected by the bottom topography, and, normally, an acceptable limit for this depth is  $h = L/2$ .

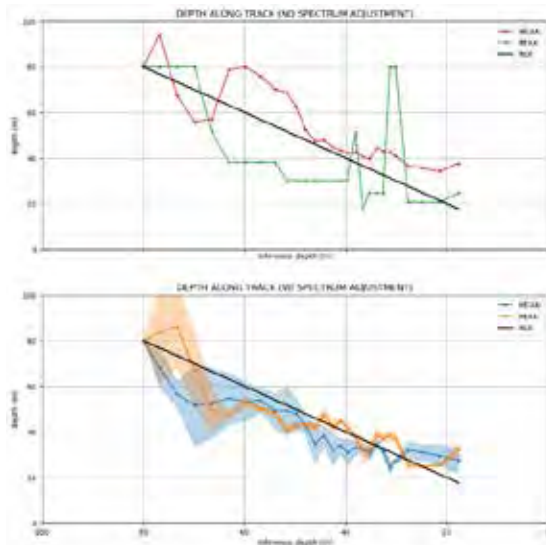


Fig.4. Depth estimated in a single wave ray. Top: Depth estimated without wave spectrum adjustment using the peak (green) and mean (red) wavelength. Bottom: Mean depth estimated using 10 independent wave spectrum adjustments, using the peak (orange) and mean (blue) wavelength, shaded areas correspond to  $\pm$  of the standard deviation considering 10 wave spectrum adjustments using 5000 random points. Black line for both plots indicate the reference bathymetry values (GEBCO) for that wave ray.

## 2.5 Ray-Tracing Algorithm

Traditionally, the derivation of bathymetry from SAR images relies on the assumption that the wave period is constant throughout the image, which can be approximately true for a relatively small domain during optimal swell conditions (Pleskachevsky *et al.*, 2011). In the Ray-Tracing Algorithm (RTA) proposed in this study, however, this assumption is slightly modified. Here, the period of the shoaling waves is only assumed constant for each wave ray. This allows for a certain degree of heterogeneity of the wave field across the image but still requires the need of consistent swell conditions during the time of the sensing. In the RTA, the shoaling waves are tracked down from a starting point (which marks the offshore limit of the intermediate waters) with a known depth obtained from an independent bathymetric source (GEBCO), until the wave breaking zone. The RTA starts by computing the FFT analysis in a sub-image with 1 km length, centered at the starting position. The mean wavelength and wave direction at this sub-image is estimated through the directional image spectra that results from the FFT analysis. The next sub-image is centered at a position reached by the displacement of one wavelength in the wave direction (Fig. 3). This procedure is repeated until the wave breaking zone. Then, the depth is calculated at each tracking position with the wavelength obtained from the FFT and maintaining the frequency retrieved at the first tracking position of each wave-ray (Eq. 2). This process is repeated for a number of wave-rays chosen to obtain the best resolution of the final bathymetry without compromising the performance of the algorithm.

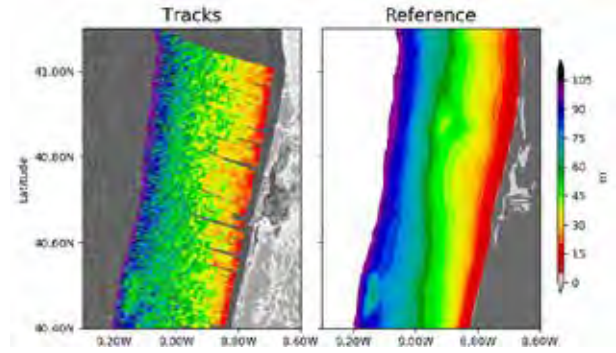


Fig.5. Left: Depth estimated using the RTA for a SAR image over the coastal region near Aveiro, Portugal. (SAR image: S1B\_IW\_GRDH\_1SDV\_20170401T183449\_20170401T183514\_004971\_008B0C\_FA9F); Right: Bathymetry from GEBCO.

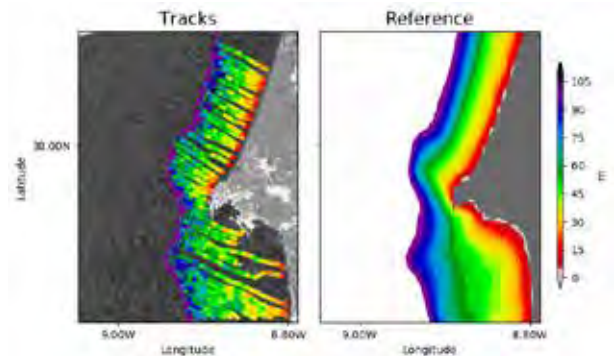


Fig. 6. Left: Depth estimated using the RTA for a SAR image over the coastal region near Sines, Portugal (SAR image: S1A\_IW\_GRDH\_1SDV\_20170206T183457\_20170206T183522\_015167\_018D0A\_F984). Right: Bathymetry from GEBCO.

## 2.6 Improving the result from the FFT analysis

The wavelength discretization is limited by the pixel resolution and the size of the SAR sub-image where the FFT is applied. The low discretization in the wavelength domain results in either constant or steep variations of the depth estimated across adjacent tracking points, especially when using the peak value of the spectrum (Fig. 4). Here, a new methodology to increase the discretization in the wavelength domain is proposed. This methodology relies on the adjustment of the two-dimensional spectrum, integrated in the directional dimension, to a Pierson-Moskowitz unidimensional function, using 5000 random points across the unidimensional spectrum curve. This method allows for a better discretization of the wavelength and consequently a better estimation of depth (Fig. 4). However, the fitting of the curve at the same tracking position produces different results, since the 5000 points are chosen randomly. This results in significantly different depth values obtained for each fit at the same tracking point. To minimize the randomness of the result, the fitting procedure is repeated 10 times for the same tracking point, and the final depth value results from the average of all the fitting results.



### 3 MAIN RESULTS

The depth estimated using the RTA for the Aveiro and Sines region can be seen in Figures 5 and 6, respectively. The reference bathymetry (GEBCO) is also plotted for comparison. Overall the main structures and slope were reproduced by the RTA, especially in the Aveiro region (Fig. 5), where the topography is smoother. In the southside of Sines (Fig. 6) the SAR-based algorithm fails since swell waves are refracted towards the south by the cape. For the Aveiro region, the average error for the absolute depth was approximately 15%, but a few tracking points showed more than 50% error on the absolute depth value, mainly due to small scale variability of the SAR image (e.g. the swell was not consistent for that sub-image). More quantitative tests need to be performed but so far the results are indicative that the bathymetry using SAR data should result from an ensemble of several images, in order to reduce the small scale variability which strongly affect the depth estimated at some tracking points.

### 4 DISCUSSION AND FUTURE WORK

The resulting bathymetric models show most of the underwater topographic structures and reproduced the correct slope, with an average of 15 to 20% errors for the absolute depth values, which are close to the error values obtained by Pleskachevsky *et al.*, (2011). These errors seem to be connected mainly to the small scale variability of the single SAR image. In the future, the final bathymetry for a given region should result from the average of multiple images, in order to reduce the high variability obtained by individual images. Several tests will be performed to evaluate the best averaging methodology across multiple individual SAR images, for example, averaging for a particular month or season or a weight averaging based on the standard deviation of the spectrum adjustments for each tracking position.

Ultimately, tests will also be performed to analyze the best methodology to interpolate the depth obtained in each tracking point to a regular grid, in order to obtain a 2D bathymetric model. Validation of the final bathymetric models will be conducted using hydrographic surveys data collected in both AOI.

The developed algorithm presented here will soon be implemented in the Co-ReSyF platform (<https://geoportal.coresyf.eu>) where the user will be able to define a region of interest and a 2D bathymetric model from that region will be derived through a set of available SAR images.

SAR derived bathymetry looks promising and can add seabed topographic information at higher resolution, especially in remote areas where the traditional hydrographic surveying methods are not performed regularly. The fusion of SAR and Optical data to obtain higher coverage and resolution over shallower waters is under development. These two methodologies are rather complementary, since

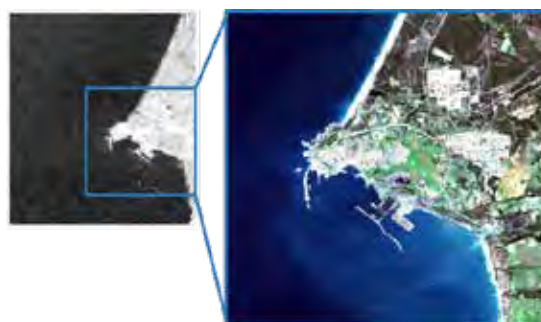


Fig. 7. Zoom of the region around Sines, on the southwestern coast of Portugal Left: SAR image from Sentinel-1B and Right: Optical data from Sentinel-2.

satellite derived methods based on multispectral images can provide bathymetric information up to 10 m, in preferably calm sea conditions (Vilar *et al.*, 2018), while depth estimation from SAR covers the areas between the 100 m depth and the wave breaking zone (which typically lies between 5 and 10 m depth), in preferably swell and moderate wind conditions. The main challenge will be focused on the fusion methodologies of both bathymetric models, especially in cases of overlapping regions with disparate results from both methods or if there is a large region with no data between the two bathymetric models. Tests of this synergy will be conducted in the region around Sines, in the southwestern coast of Portugal (Fig. 7).

#### Acknowledgements

This work is part of a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 687289.

#### REFERENCES

- Hasselmann, K., R. K. Raney, W. J. Plant, W. Alpers, R. A. Shuchman, D. R. Lyzenga, C. L. Rufenach and M. J. Tucker (1985). Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: a MARSEN view. *Journal of Geophysical Research*, 90(C3), 4659–4686.
- Lamas L., J.P. Pinto, F. Sancho, A. Azevedo, F. Birrien, P. Vilar and A. Moura (2018). High-resolution coastal bathymetry retrieved from satellite data: a research application within the Co-ReSyF project. *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU2018-129.
- Pleskachevsky, A., S. Lehner, T. Heege and C. Mott (2011). Synergy and Fusion of optical and synthetic aperture radar satellite data for underwater topography estimation in coastal areas. *Ocean Dynamics*, 61: 2099-2120
- Vilar P., A. Moura, R. Guerreiro, L. Lamas, J. P. Pinto (2018). A multispectral earth observation approach for retrieving bathymetric data: models and in situ data evaluation. *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU2018-452.

# Operacionalização de metodologias para a extração de batimetria a partir de dados de detecção remota

Pedro Vilar (1), Ana Moura (1) e Luísa Lamas (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal. E-mail: [pedro.vilar@hidrografico.pt](mailto:pedro.vilar@hidrografico.pt)

**Resumo:** No âmbito do projeto Horizon 2020 Coastal Waters Research Synergy Framework (H2020 Co-ReSyF), o Instituto Hidrográfico (IH) tem contribuído para o desenvolvimento e validação de metodologias de extração de informação batimétrica a partir de imagens de satélite (*Satellite Derived Bathymetry-SDB*) multiespectrais e SAR. O presente artigo pretende apresentar uma aplicação operacional desenvolvida no IH no âmbito do projeto Co-ReSyF para a automatização do processo de derivação de batimetria a partir de imagens multiespectrais obtidas pelos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 aplicando uma metodologia que tem vindo a ser estudada no IH. Com esta ferramenta pretende-se o máximo automatismo possível na derivação de modelos SDB, beneficiando de uma capacidade de atualização constante de informação batimétrica para zonas costeiras de baixas profundidades (normalmente inferiores a 10 m) que não existia anteriormente. Esta capacidade operacional tem numerosas vantagens e aplicações, nomeadamente, em estudos de dinâmica sedimentar, na deteção de alterações de fundo, na gestão de alertas e riscos, entre outros.

**Palavras-chave:** *Satellite Derived Bathymetry*, Deteção Remota, Operacionalização, Batimetria.

## 1. INTRODUÇÃO

No Instituto Hidrográfico (IH) têm sido estudadas algumas metodologias SDB a partir de imagens de satélite multiespectrais (Guerreiro e Moura, 2015; 2016). Mais recentemente, no âmbito do projeto Horizon 2020 Coastal Waters Research Synergy Framework (H2020 Co-ReSyF), o IH tem contribuído também para a implementação e validação de metodologias SDB a partir de imagens *synthetic aperture radar* (SAR) (Lamas *et al.*, 2018). Com o objetivo de automatizar e operacionalizar a derivação de batimetria a partir de imagens multiespectrais, foi desenvolvida e programada a aplicação computacional DeepInEye. Esta aplicação implementa uma metodologia baseada no algoritmo proposto por Stumpf *et al.* (2003) e permite a derivação de batimetria a partir de imagens adquiridas pelos satélites Landsat-8 e Sentinel-2. A automatização do processo reduz significativamente o tempo de processamento e, conseqüentemente, permite uma maior taxa de aquisição de modelos SDB contribuindo diretamente para estudos de avaliação e validação, quer da metodologia quer dos resultados. Através da aptidão operacional oferecida pela aplicação, pretende-se também beneficiar de uma capacidade de atualização constante da informação batimétrica em vários domínios de aplicação que não existia anteriormente, nomeadamente em estudos de dinâmica sedimentar, na gestão de alertas, no apoio à produção de cartografia náutica e ao planeamento de levantamentos hidrográficos (LH), etc.. Este artigo descreve a aplicação DeepInEye, a metodologia implementada para a derivação de batimetria, bem como as suas capacidades operacionais em vários domínios de aplicação de âmbito costeiro.

## 2. DERIVAÇÃO DE BATIMETRIA A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

O processo de derivação de batimetria implementado na aplicação desenvolvida resultou de uma investigação efetuada no âmbito do projeto H2020 Co-ReSyF (Vilar *et al.*, 2018a) tendo por base uma metodologia desenvolvida por Guerreiro e Moura (2015; 2016). A metodologia SDB implementada na aplicação é composta pelas seguintes fases: cálculo da refletância espectral, separação água-não água, correção da refletância do efeito do brilho solar e a implementação do algoritmo de Stumpf *et al.* (2003) para a derivação de batimetria. De seguida, de forma sucinta, é descrito o processo implementado na aplicação desenvolvida (Fig. 1).

### 2.1 Determinação da Refletância Espectral

No processo de derivação de batimetria está implementado o cálculo da refletância *Top of Atmosphere* (TOA) para os sensores Landsat-8 e para o Sentinel-2A/B. De modo a considerar uma correção atmosférica, o algoritmo permite a utilização da refletância à saída da coluna de água (*Water-Leaving reflectance* - WL) proveniente da aplicação ACOLITE (Vanhellemont e Ruddick, 2016) também para imagens Landsat-8 e Sentinel-2.

### 2.2 Separação Água – Não Água

A separação Água-Não Água é realizada através do *Normalized Difference Water Index* (NDWI). No caso das imagens do sensor Landsat-8 existe a possibilidade de se optar entre o NDWI e o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) pois a banda da região do infravermelho de comprimento de onda curto (SWIR) possui a mesma resolução espacial que as bandas da região visível.

### 2.3 Correção do Brilho Solar

A correção do brilho solar nas refletâncias é realizada segundo o método proposto por Hedley *et al.* (2005). Este método utiliza uma amostra de pixéis em águas profundas que apresentem brilho solar e pixéis com ausência de brilho nas bandas do visível a corrigir, e que através de uma regressão linear desta amostra nestas bandas com a banda do infravermelho próximo (NIR), determina a equação de correção do brilho solar.

### 2.4 Algoritmo de Derivação de Batimetria

Na derivação de batimetria ( $Z$ ) utilizou-se o algoritmo proposto por Stumpf *et al.* (2003):

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0$$

Este algoritmo baseia-se no rácio dos logaritmos das refletâncias de duas bandas espectrais com diferentes níveis de absorção na água (denominado de modelo relativo), sendo  $R_w(\lambda_i)$  a banda do azul e  $R_w(\lambda_j)$  a banda do verde. Através de uma relação linear entre o rácio dos logaritmos das refletâncias e um conjunto de profundidades de referência são determinados os modelos batimétricos. A variável  $n$  é uma constante inteira positiva para que os logaritmos tomem um valor positivo de modo a existir uma resposta linear do modelo,  $m_1$  é uma constante que dimensiona o rácio com a profundidade de referência e  $m_0$  representa o *offset* para a profundidade de 0 m. Adicionalmente, ao longo da investigação da metodologia, têm sido efetuados alguns testes aplicando uma relação polinomial de grau 2 entre o rácio dos logaritmos e as profundidades de referência para determinar os modelos SDB. Esta relação quadrática também se encontra implementada na aplicação.



Fig. 1. Fluxograma da metodologia implementada na aplicação DeepInEye para a derivação de batimetria.

## 3. SOFTWARE DeepInEye – APLICAÇÃO DESENVOLVIDA

### 3.1 Estrutura da Aplicação

A aplicação DeepInEye foi desenvolvida na linguagem de programação Python 2.7. Este *software* é composto por uma interface gráfica com o utilizador (Fig. 2) e por rotinas que incluem módulos computacionais (Fig. 3) que aplicam a metodologia descrita anteriormente (Fig. 1).



Fig. 2. Interface Gráfica com o Utilizador do Software.

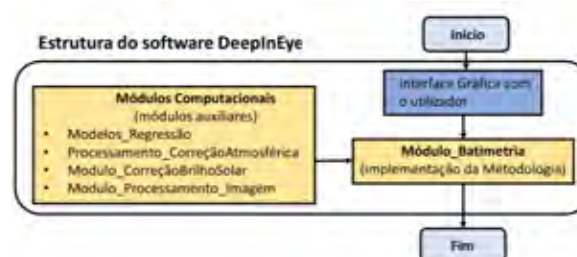


Fig. 3. Estrutura conceitual do Software.

### 3.2 Operação com o Software

A aplicação inicia com a interface gráfica mostrada na Fig. 2. Ao surgir esta interface, o utilizador escolhe, em primeiro lugar, se pretende derivar modelos batimétricos recorrendo ao cálculo da refletância TOA ou WL, conforme indicado no ponto 2.1 do presente artigo. Dependendo da opção selecionada os ficheiros de entrada para a operação da aplicação serão diferentes. No primeiro caso (refletância TOA) são necessários os ficheiros correspondentes às bandas do azul, verde e NIR provenientes das imagens de Landsat-8 ou Sentinel-2. No caso de se pretender utilizar Landsat-8 poderá ser necessário ter a banda SWIR se se pretender realizar a separação Água-Não Água com o MNDWI. Todos os ficheiros correspondentes às bandas devem estar georreferenciados no sistema de referência *World Geodetic System 1984/Universal Transversa de Mercator (WGS84/UTM)*. Ainda para as imagens de Landsat-8 é necessário possuir o ficheiro de meta-dados que acompanha a imagem. Para a opção da refletância WL é necessário o ficheiro *.nc* (formato NetCDF) proveniente da aplicação ACOLITE (Vanhellemont e Ruddick, 2016). Para todas as opções anteriormente referidas será necessário um ficheiro em formato *.txt* que contenha a informação referente às profundidades de referência com as respetivas posições fornecidas em coordenadas geográficas no sistema de referência WGS84. Após se indicar a opção escolhida e indicados os ficheiros de entrada, serão necessários mais parâmetros ao cálculo do algoritmo indicados pelo utilizador, tais como, o valor de *threshold* para

separação Água - Não Água, as coordenadas dos cantos da zona de estudo pretendida no sistema de referência WGS84/UTM bem como as coordenadas da amostra de pixels para correção do brilho solar e ainda o valor de  $n$  a aplicar no cálculo do rácio dos logaritmos das refletâncias. Como resultados, o *software* exporta as bandas do cálculo da refletância, o modelo relativo e o modelo batimétrico SDB em formato *.GeoTiff*.

#### 4. OPERACIONALIZAÇÃO DE PRODUTOS SDB

A aplicação foi testada com imagens em diferentes localizações da Costa Portuguesa, nomeadamente na Foz do rio Minho e na Foz do rio Tejo em Lisboa. Recorrendo a diferentes casos de estudo descritos seguidamente, são mostradas as aplicações operacionais da metodologia e do *software* desenvolvidos.

##### 4.1. Caso de Estudo I: Derivação de Batimetria na Foz do Rio Minho – Caminha, Portugal.

Este primeiro caso de estudo pretende testar a viabilidade e a aplicabilidade do *software* desenvolvido de modo a apoiar as atividades no projeto Co-ReSyF. Para tal, foram derivados modelos SDB para a zona da Foz do Rio Minho. Os dados utilizados estão indicados na Tabela I.

Tabela I. Dados utilizados para derivação e validação de modelos SDB.

Satélite/Sensor	Data de Aquisição
Landsat-8 OLI/TIRS	28/06/2016
Sentinel-2A MSI	29/06/2016
Profundidades de Referência	Período de Aquisição
Carta Náutica 24609	Dados adquiridos através de um LH a feixe simples de ordem 1b realizado em 2011
Dados de Validação	Período de Aquisição
Levantamento Hidrográfico Multifeixe de ordem 1b	junho 2016 – julho 2016

Para cada uma das imagens indicadas na Tabela I foram derivados os respetivos modelos SDB, utilizando sondas extraídas da Carta Náutica 24609 para calibrar os modelos batimétricos. De modo a validar os modelos SDB foi utilizado um LH multifeixe de ordem 1b na zona de Caminha (Tabela I). Na Fig. 4 apresentam-se os modelos SDB obtidos.

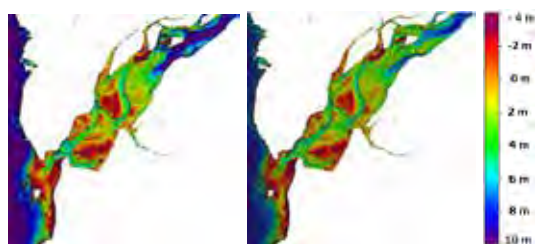


Fig. 4. Modelo Batimétrico para a Imagem de Landsat 8 (esquerda) e Sentinel-2A (direita)

A validação dos modelos foi realizada através das diferenças entre o modelo SDB e um modelo gerado a partir do LH adquirido em 2016 (Tabela II).

Tabela II. Estatística das Diferenças entre modelo SDB e modelo LH para validação de resultados.

	Sentinel-2A MSI	Landsat8 – OLI/TIRS
Mínimo	-10.3 m	-9.4 m
Máximo	3.3 m	2.4 m
Média	-1.4 m	-1.1 m
Desvio-Padrão	1.7 m	1.7 m

Com os resultados obtidos para este primeiro caso de estudo, através da operacionalização que a aplicação DeepInEye oferece, é possível a utilização de uma metodologia SDB de forma automatizada em vários domínios que antes não se verificava.

Assim, de modo a utilizar os modelos SDB derivados pela aplicação no apoio ao estudo da dinâmica dos fundos na zona em questão, avaliou-se o potencial da informação batimétrica derivada a partir de uma série temporal de imagens multiespectrais Landsat-8 e Sentinel-2. Na Tabela III podem ser identificados os dados utilizados. Na Fig. 5 são apresentados os modelos SDB para a série temporal em questão.

Tabela III. Dados utilizados na série temporal.

Satélite/Sensor/ Data de Aquisição	
Landsat-8   17/08/2014	Sentinel-2A   29/06/2016
Sentinel-2A   04/08/2015	Sentinel-2A   18/01/2017
Sentinel-2A   14/03/2016	Sentinel-2A   14/07/2017
Profundidades de Referência	Período de Aquisição
Carta Náutica 24609	2011

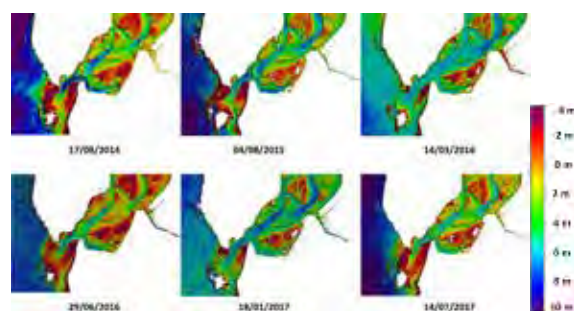


Fig. 5. Série Temporal de modelos SDB obtidos para a Foz do Rio Minho, Caminha, Portugal.

Analisando os modelos batimétricos obtidos (Fig. 5), de uma forma geral, é possível perceber a dinâmica sedimentar ocorrida na área de estudo, entre agosto de 2014 e julho de 2017. No canal de entrada identifica-se um comportamento cíclico de abertura e de fecho da barra. Quanto aos canais interiores de navegação e às zonas de fundeadouro, ocorre uma variabilidade significativa e uma tendência de assoreamento destes canais e nos baixios onde se encontram os fundeadouros. Assim, aplicando esta metodologia operacional através deste caso de estudo, é possível identificar uma mais-valia

desta operacionalização na compreensão da dinâmica dos fundos.

#### 4.3. Caso de Estudo II: Apoio à remoção do Navio *Betanzos* utilizando produtos SDB.

Este segundo caso de estudo pretende demonstrar a aplicabilidade de produtos SDB (Fig. 6), obtidos através da aplicação desenvolvida, que foram entregues à Autoridade Marítima Nacional para apoio às operações de remoção do navio '*Betanzos*' (Vilar *et al.*, 2018b).

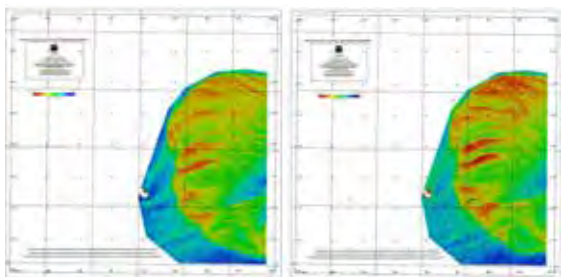


Fig. 6. Série Temporal de produtos SDB obtidos para as goladas do Rio Tejo, Lisboa, Portugal.

Como o último LH disponível para a zona em estudo datava de 2015, não existia informação batimétrica à data do encalhe do navio. Utilizando uma imagem de Sentinel-2B (19 de Novembro de 2017) e outra de Sentinel-2A (30 de janeiro de 2018) foram obtidos modelos SDB para adquirir batimetria na Golada do Bugio. Estes produtos foram entregues à Autoridade Marítima durante as operações de remoção no navio.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

A aplicação computacional DeepInEye foi experimentalmente aplicada para diferentes regiões da Costa Portuguesa, mostrando estar apta para obter modelos batimétricos SDB de modo operacional em zonas costeiras de baixas profundidades a partir de imagens de satélite multiespectrais através da metodologia implementada. A operacionalização/automatização dada por esta aplicação permitiu até à data obter informação batimétrica para diversos fins, tais como a entrega de produtos operacionais a entidades nacionais em tempo útil para apoio à decisão nas suas atividades. Por outro lado, foi possível perceber o seu potencial operacional, quer no desenvolvimento das atividades do projeto H2020 Co-ReSyF, quer na atualização de informação através da constante disponibilização de novas imagens, podendo ser utilizada como uma ferramenta de apoio à decisão em vários domínios de aplicação onde seja necessária informação batimétrica. Estando a ferramenta operacional de base atualmente desenvolvida, projeta-se a adição de novas funcionalidades na mesma, tais como, a extensão a outros sensores. Devido à limitação das metodologias que recorrem a imagens multiespectrais apenas derivarem modelos

batimétricos a baixas profundidades prevê-se o estudo da possível integração e operacionalização com metodologias SAR (Lamas *et al.*, 2018) de forma a obter batimetria a outras escalas de profundidades.

## REFERÊNCIAS

- Guerreiro, R., e Moura, A. (2015). Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Lisboa, 29-30 outubro.
- Guerreiro, R., e Moura, A. (2016). A utilização de imagens de satélite multiespectrais de elevada resolução espacial para a derivação de batimetria. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa, 21-23 junho.
- Hedley, J.D., Harborne, A.R., Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 10, Págs. 2107 – 2112.
- Lamas, L., Pinto, J.P., Sancho, P., Azevedo, A., Birrien, F., Vilar, P., Moura, A (2018). High-resolution coastal bathymetry retrieved from satellite data: a research application within the Co-ReSyF project. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 20, EGU-2018-129.
- Stumpf, R. P., Holdereid, M. e Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol.48, No. 1, Part 2, 547-555.
- Vanhellmont, Q., e Ruddick, K. (2016). ACOLITE for Sentinel-2: aquatic application of MSI imagery. *2016 ESA Living Planet Symposium*. Prague, 9-13 maio.
- Vilar, P., Moura, A., Guerreiro, R., Lamas, L., J.P.Pinto. (2018a). A multispectral earth observation approach for retrieving bathymetric data: models and in situ data evaluation. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 20, EGU-2018-452.
- Vilar, P., Guerreiro, R., Moura, A, Monteiro, C. Videira Marques, C. (2018b). Produtos *Satellite Derived Bathymetry* no apoio à Decisão às Operações de remoção do navio '*Betanzos*'. *5as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa, 19-21 junho. (em publicação)

## An approximation to a common Iberian Vertical Datum Surface.

Espinosa, S. (1), Torres, J.R. (1)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), España. E-mail: [sespinosa@fn.mde.es](mailto:sespinosa@fn.mde.es)

**Abstract:** On the basis of a clear statistical correlation between tidal datum ellipsoidal height and geoid undulation values, derived from geodetic measurements and tide gauge data along the Spanish continental and canary coast, a redefinition of chart datum applying this clear relationship is suggested, always taking into account safety of navigation parameters. In this particular case, computation of the hydrographic datum at any given point over a wide area of the Spanish coast could be determined by knowing just the geographic coordinates and the geoid undulation value from EGM2008 - REDNAP model published by the National Geographic Institute of Spain (IGN, Spain). Moreover, this idea could bring substantial advantages when expanded to the entire Iberian Peninsula, as Portugal and Spain could share a common tidal reference surface, thoroughly linked to the vertical land-height datum

**Keywords:** Hydrographic Reference Surface, RTK, Geoid Undulation

### 1. INTRODUCTION.

A particular characteristic of nautical cartography is the use of a vertical datum different from the one used in terrestrial cartography. The incorporation of GPS resulted in a generalized use of data related to a universal terrestrial geocentric system which has solved many problems derived from the existence of the different previous local projection systems. However, the aforementioned universality is valid only for the planimetric coordinates, since the different countries have continued using national altimetric references for the Z coordinate (Vertical Terrestrial Datum, VTD), as is the case of Spain and Portugal, that take as vertical datum for terrestrial cartography the value of the mean sea level in Alicante and Cascais, respectively.

The approach proposed by hydrographers for the calculation of the vertical datum in nautical cartography has traditionally been very different from the topographical maps, motivated among other reasons because of the primary objective at sea which is the safety of navigation. As a result, a valid safe vertical reference (usually, although not necessarily, LAT Lowest Astronomical Tide<sup>1</sup>.) has to be established for each particular zone, usually delimited by the frames of nautical charts. Thus, most of the time, mariners find more water clearance under the keel than depth represented in nautical charts. Consequently, the usual procedure applied by Hydrographic Offices has been to calculate the Chart Datum (CD) in specific places, close to survey areas. The result is a series of isolated and independent data in different points of the coast with no seamless continuity.

Throughout recent years, thanks to the development of new GNSS observation techniques, benchmarks' ellipsoidal height measurements have been taken in a significant number of tide stations, obtaining CD ellipsoidal height value in each station. In Spain, Puertos del Estado (PdE) have a great number of permanent tide gauges, which are complemented by Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) and other institutions: Instituto Español de Oceanografía (IEO), Instituto Geográfico Nacional (IGN). In addition, some of these benchmarks have been linked to the terrestrial high precision leveling networks obtained from geometric leveling, which links vertical references from one station to another with high precision.

A relevant issue is that LAT ellipsoidal height has a spatial variation as we move away from a tide station. Values of this variation depend on the specific location. This value, when is well known, can be used to define an approximation to a seamless Chart Datum Ellipsoidal Height (CDEH). In this case, a fixed value for CDEH should not be used in a wide area when using RTK (Real time Kinematic) techniques for measuring the tide.

The characterization of the geoid has experienced a great advance in the last few years motivated by geodesic measurements within a national network. This has allowed a densification and adjustment of the orthometric reference level throughout the Spanish territory. IGN has published the EGM 2008-REDNAP model, as an improvement to the previous 2008 EGM model. This new model allows the transformation between ellipsoidal and orthometric heights for certain purposes, such as the reduction of bathymetric data to the CD when working with GPS RTK techniques, what would avoid using tide gauges

<sup>1</sup> International Hydrographic Organization (IHO), 2008. Technical resolution A2.5 Datums and Benchmarks

([https://www.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/DPSWG/DPSWG11/M3-E-JULY15\\_Resolutions.pdf](https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/DPSWG/DPSWG11/M3-E-JULY15_Resolutions.pdf))

for this purpose when CD variation is well known. Likewise, Portugal has adopted the GeodPT08 model (Catalão and Sevilla, 2009), which results from a densification and adjustment of the regional geoid ICAGM07. In both cases very similar results have been achieved in resolution and accuracy.

It is relevant to know if a relationship is found between CDEH-values, calculated by hydrographers, with the corresponding discrete geoid undulation values (N) in those tidal stations contributed by land-surveyors, despite having been calculated from different techniques motivated mostly by a totally different data purpose. Apparently, this relationship seems not quite obvious, due to spatial variations of mean sea level and tidal dynamics. But if it clearly exists, we could infer a continuous coastal CD surface model obtained practically in a direct way inferred from the value of N. Advantages offered by this approach are significant, since it would allow to calculate a continuous model of the CD along the entire coastal area from the discrete data of the tide stations just knowing N variability. Thus, this models can be employed as vertical reference surfaces for RTK surveys, where vertical data obtained is ellipsoidal height.

This paper shows a clear statistical correlation between both values (CDEH and N) in most of the peninsular coastal area.

It is important to highlight the need to densify data in the future with new tide stations, what would allow for a better adjustment of the model. However, clear correlation, the immediacy and continuity of the proposed CD-model as well as the immediate correspondence with the vertical reference on land in every point, present enormous advantages that should be considered, especially in the case of border areas. A common approach of a seamless vertical reference can be useful for both Iberian Hydrographic Offices (Portuguese and Spanish).

## 2. DESCRIPTION OF REFERENCE TIDAL STATIONS

In order to make a first estimate of the relationship between the CDEH and the corresponding values of N, a total of 33 tidal stations of the Spanish coast were chosen in which CD ellipsoidal heights were known. The following observations can be made:

- Despite final result will be merged in a unique surface, in order to take into account a better regression adjustment, stations have been divided into **3 groups** represented by different geographical areas to study the behavior of each individual zone. The groups chosen were Zone 1, Galician-Cantabrian (9 stations), Zone 2, Cádiz (9 stations), and Zone 3, Mediterranean (15 stations).

- The **zoning criterion** was a compromise between spatial LAT variation within each group of stations and try to find a significant number of samples.
- The exposed results should be considered as an **initial approximation** that needs future adjustment through a more rigorous zoning and a densification of the tide observations where necessary. This is - as we already anticipated - the main proposal of this paper: to improve this initial approach with a common effort to be made by Iberian Hydrographic Offices, with the aim of defining a common Hydrographic Reference Surface, especially useful in border areas.

The figure presents the areas described as well as distribution of the tide stations that become part of the regression models proposed for each zone (Fig. 1):

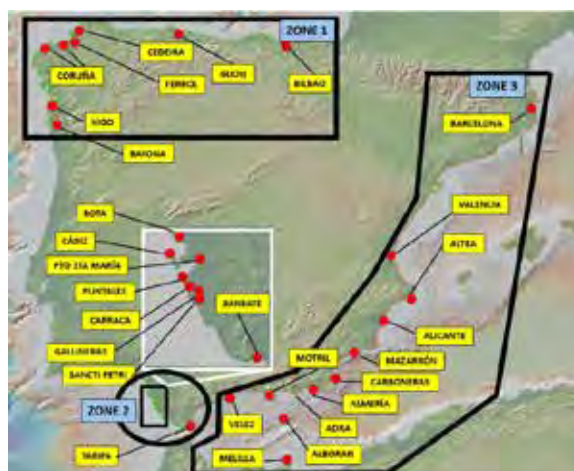


Fig. 1. Tide stations distribution where the regression models have been proposed for the calculation of the CDEH as a function of the N-value. Yellow colour stations used for calculation.

## 3. TOWARDS A COASTAL CHART DATUM GEOID-BASED MODEL

### 3.1 A first approximation: linear and second degree models.

Once selected the tidal stations sample model and groups formed, it is proposed the study of mentioned relationship:

$$(1) \quad \text{CDEH}(N) = f(N) + \xi(x)$$

CDEH(N): CD ellipsoidal height predicted by the N-value dependent model.

f(N): Regression functions that relate CDEH and N values

$\xi(x)$ : Residual values, differences between calculated and predicted value in the stations.

Using this data, one regression function was calculated between the N and CDEH for each zone, two of them linear and the other quadratic.

Graphic results for the regressions are presented in each of the studied zones (Fig. 2):

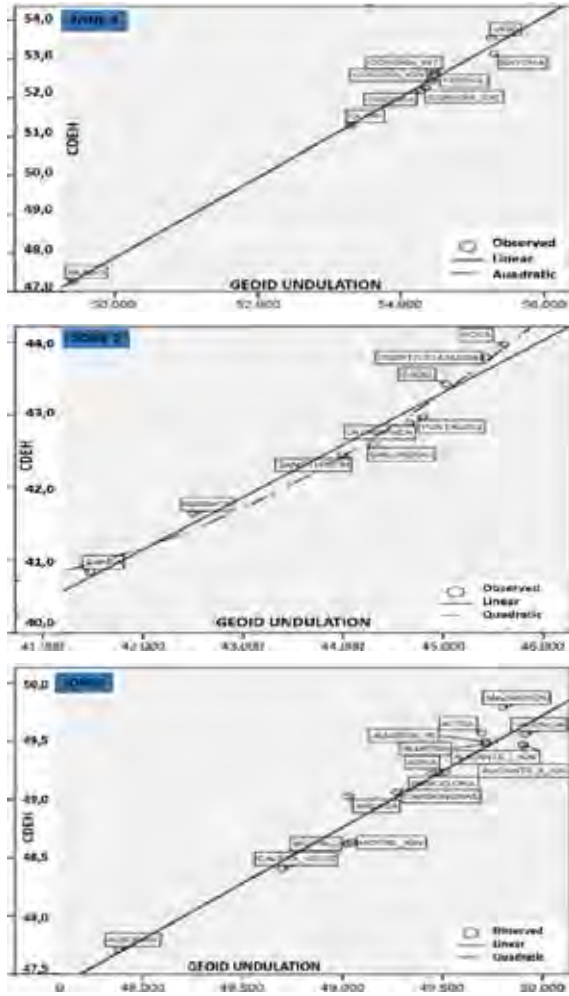


Fig. 2. Linear and second degree polynomial regressions in each zone. Variable used for prediction: Geoid undulation at tide station. Dependent variable: CD Ellipsoidal height at tide station.

As can be seen, there is an evident relationship between the values of the CDEH and those of the geoid undulation (N). The relationship is practically linear in the Galician-Cantabrian and Mediterranean areas. It is precisely in these two areas where a less spatial variation of Chart Datum Orthometric Height (CDOH) along the coastline is found. Similar approach is found in other works (Slobbe *et al.*, 2013).

On the other hand, in Cádiz the CDOH shows a higher gradient. In these case the quadratic solution contributes to improve the R-square value, finding a significant value for the  $x^2$  term. These results coincide with the geodesic and geophysical approaches presented by other (Sánchez Sobrino *et al.*, 2012). Trust on the model can be guessed with statistical techniques, usually from entry uncertainties (Dodd *et al.*, 2011).

This explains the need to take into account the magnitude of CDOH gradient when determining limits of each zone. This gradient can be calculated *a priori* and regressions improvements should be expected when limiting the area to a small CDOH variation. Densification of data measures are needed in these areas with high CHOH gradients. Even with

the limitations of this provisional data, initial results are very encouraging and show a very interesting evidence which can be the base for a future hydrographic reference surface model based on the strong weight of N known value. Given an N undulation surface, CDEH could be directly inferred at any given point. Open sea values could be inferred taking into account N values and altimetry values obtained in areas with no land contamination (Hughes Clark *et al.*, 2005; Vignudelli *et al.*, 2008).

The magnitudes of residuals shown in the graphs (Fig. 3; 5) show reasonable differences, for a first approximation, between predicted and *in situ* measured values:

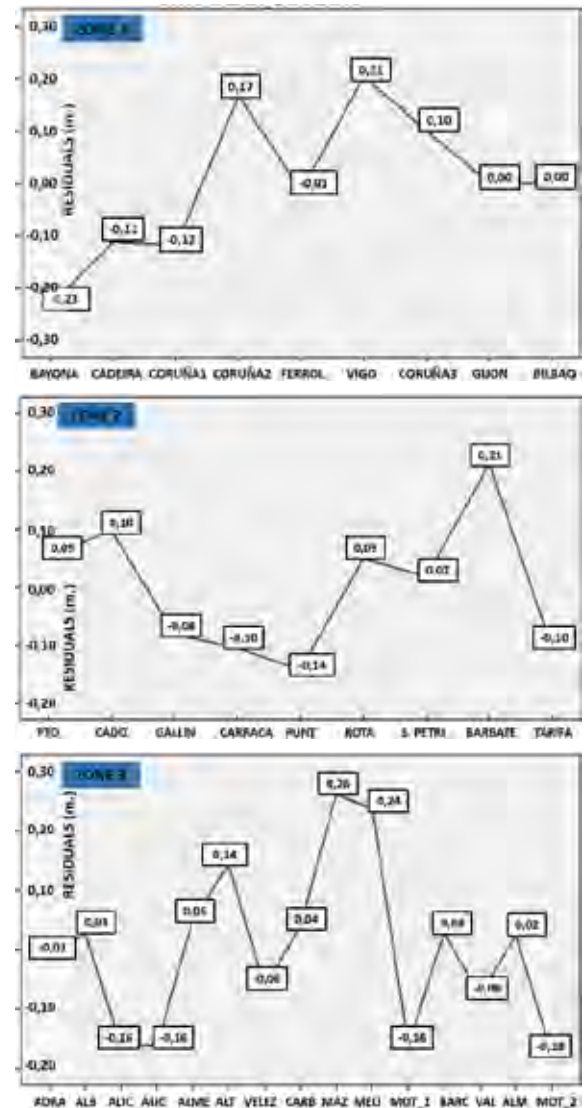


Fig. 3. Residuals for predicted values in tide stations used for regression calculation.

### 3.2 Behavior of the regression models in other tidal stations

Once regression models have been determined, other tide stations are put into test. These stations did not participate in the calculations of the regression models. A total of 7 new stations have been used for



validation. Fig 4. shows location and residuals obtained at these new tide stations.

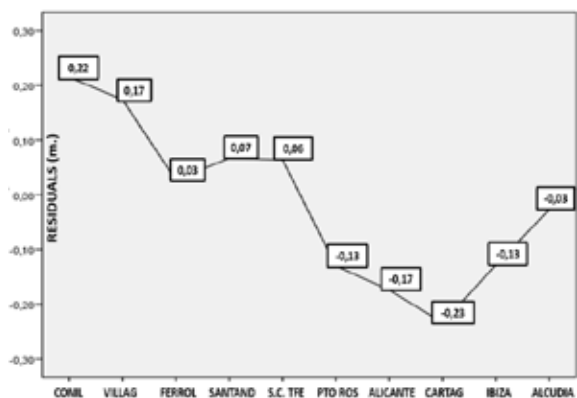


Fig.4. Residual values from comparing in situ data and regression model in the 10 validation stations.

As can be seen, residuals are around values of less than 20 centimeters. Similar values were found in the other 33 stations included in calculation of the regressions.

As a graphic summary, the geographical distribution of the stations in each zone is shown, including the value of the residual  $\xi$  (x) in each of them (Fig. 5).

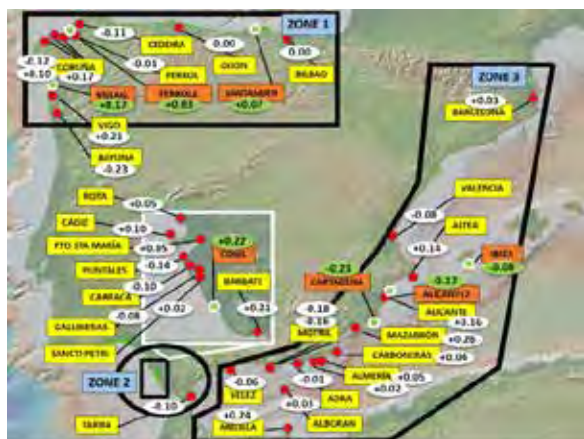


Fig. 5. Residual values. Control stations are labeled in yellow. In orange validation stations.

The idea of this approximation could also be extended for several purposes, where interesting applications can be found such as establishment of local standard vertical reference levels linked to terrestrial references for marine engineering works.

A definition of the continuous CD as proposed would have the advantages of its rigor and simplicity what would save efforts in calculation.

Although it is clear that more precise models could be found than those described, the effort to do so can be quite big when very rigorous criteria is adopted. With an adequate evaluation of residuals, conclusions can be drawn about the feasibility of using a CD hydrographic surface based on proposed model, always focusing safety navigation parameters recommended by the IHO and would offer a seamless surface also related to the vertical reference used for terrestrial altimetry.

#### 4. CONCLUSIONS

From the analysis of data calculated in tide stations it is concluded that CD ellipsoidal heights are closely related to the value of the geoid undulation in almost the whole Spanish coast. This behavior can be also evaluated in the Portuguese coast.

This characteristic opens the possibility of proposing the development of a common hydrographic vertical reference surface useful for Spanish and Portuguese Hydrographic Offices, which would require a joint project based on an adequate segmentation and densification of observations in the Spanish and Portuguese coasts in order to obtain convincing results through appropriate functions capable of linking both data series with admissible residual values.

In addition to the cartographic purposes desired, a common vertical reference surface calculated on the basis of the N values may be also useful for many other technical and scientific purposes as relating different vertical references, as could be the future European Vertical Reference System (EVRS) imposed by INSPIRE Directive.

#### REFERENCES

- Catalão, J. and Sevilla, M.J. (2009). Vertical datum unification on Iberia and Macaronesian islands using multi-sensor gravity data and GRACE geopotential model. *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/j.jog.2009.03.001.
- Dodd, D., Mills, J. (2011). Ellipsoidally referenced surveys: issues and solutions. *International Hydrographic Review*. November 2011, 19-29.
- El nuevo modelo de geoide para España EGM2008 REDNAP (2011). Taken from <http://ftp.geodesia.ign.es/documentos/> accessed September 20, 2016.
- Hughes Clarke, J.E., Dare, P., Beaudoin, J., Bartlett, J., (2005). A stable vertical reference for bathymetric surveying and tidal analysis in the high Arctic. *U.S. Hydrographic conference*, March 2005.
- Sánchez Sobrino, J. *et al.*, (2012). Adjustment of orthometric heights in the Spanish geodetic network. *Proceedings. 7ª Asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica S01* (1), 29-34.
- Slobbe C., Klees, R., (2013). Lowest astronomical tide in the North Sea derived from a vertically referenced shallow water model, and an assessment of its suggested sense of safety. *Journal Marine Geodesy* 36(1), 31-71.
- Vignudelli, S., *et al.*, (2008) Satellite altimetry near coasts. Current practices and a look at the future. Taken from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.536.9128&rep=rep1&type=pdf> accessed August 20, 2017

# Geração de Modelo Digital de Superfície a partir de imagens adquiridas por VANT

S. Godinho (1), A. Carvalho (1), J. Carvalho (3), J. Gaspar (2) e P. Nunes (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal. E-mail: [sonia.godinho@hidrografico.pt](mailto:sonia.godinho@hidrografico.pt)

(2) Centro de Investigação Naval, Alfeite

(3) Emílio de Azevedo Campos, S.A. - Topografia, Amadora

**Resumo:** A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT), também designados por *drones*, em levantamentos fotogramétricos tem-se revelado como um método expedito para aquisição de dados topográficos, pela capacidade que apresentam na recolha de dados sobre a superfície terrestre num curto espaço de tempo, de forma flexível e a um custo reduzido.

O presente artigo pretende apresentar a análise desenvolvida no Instituto Hidrográfico, com o objetivo de avaliar o potencial dos modelos digitais de superfície (MDS) gerados através de fotogrametria analítica e VANT, para complementar os levantamentos hidrográficos nas zonas intertidais e extensões de praia. O trabalho reflete também a comparação com uma nuvem de pontos adquirida através de um sistema *laser scanner* terrestre e com levantamentos topográficos por GNSS.

**Palavras-chave:** VANT, fotogrametria, *laser scanner*, MDS, nuvem de pontos

## 1. INTRODUÇÃO

A topografia e geodesia têm beneficiado dos desenvolvimentos tecnológicos operados ao nível dos sensores. A evolução da tecnologia torna possível a aquisição de um maior volume de dados com qualidade, adaptados à diversidade de necessidades dos utilizadores com um custo mais reduzido.

O *laser scanner* e a fotogrametria com veículos aéreos não tripulados (VANT) são exemplos de metodologias que têm apresentado um incremento de utilização. Atualmente são métodos viáveis para a obtenção de nuvens de pontos de alta densidade e geração de modelos digitais de superfície de alta resolução. Os princípios teóricos que sustentam as técnicas não são novos, todavia a evolução dos equipamentos e a capacidade de processamento têm permitido melhorar a qualidade de aquisição de dados 2D e 3D no terreno. Este incremento de capacidade reflete-se numa aquisição de dados, mais rápida, permitindo diminuir os custos associados ao trabalho de campo.

O Instituto Hidrográfico pela natureza da sua missão realiza levantamentos hidrográficos (LH) para apoio à atualização cartográfica, monitorização de dragagens e obras de hidráulica marinha, e para outros fins. Paralelamente realiza levantamentos topográficos das zonas de interface terra e água.

Este trabalho pretende explorar potenciais aplicações das técnicas de *laser scan* e da fotogrametria no âmbito dos LH e avaliar a utilização da fotogrametria por VANT na geração de nuvens de pontos, ortofotos, modelos digitais de superfície e modelos digitais do terreno (J. Chris McGlone, 2013). Num âmbito mais geral existe a intenção de avaliar se esta metodologia cumpre os requisitos de posicionamento para trabalhos topográficos de apoio aos LH em zonas de

transição terra/água: zonas intertidais, sapais, praias e em zonas de difícil acesso.

O artigo apresenta quatro seções: a seção Problema e Objetivos dedicada a explicar o problema que se pretende estudar e os objetivos estabelecidos para a análise; a seção da Metodologia onde será apresentada a metodologia adotada; a seção Resultados onde serão expostos os resultados obtidos; e por fim uma seção com a conclusão do trabalho.

## 2. PROBLEMA E OBJETIVOS

O trabalho foi desenvolvido para responder à seguinte questão: Os produtos obtidos por fotogrametria aplicada a imagens digitais de VANT garantem a qualidade posicional dos levantamentos topográficos (LT) e permitem gerar modelos digitais de zonas de fronteira terra/água compatíveis com os requisitos dos LH?

Foi com base nesta questão que foi escolhida a área de estudo: uma zona de lodo intertidal situada no concelho do Seixal, junto à Base Hidrográfica da Azinheira (Fig. 1).

Esta área apresenta aspetos característicos, tidos em consideração para os objetivos da análise: é uma zona intertidal, lodosa, de difícil acesso para um LT pedestre e apresenta infraestruturas e edifícios, e zonas com muita uniformidade de texturas.

Com a análise pretende-se responder aos seguintes objetivos (i) Analisar se a exatidão posicional dos produtos derivados de fotogrametria por VANT cumprem os requisitos dos LT para efeitos de Hidrografia; (ii) Verificar a adequabilidade dos produtos derivados da fotogrametria por VANT no enquadramento dos trabalhos topográficos.



Fig. 1. Área de estudo – Base Hidrográfica da Azinheira.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu no planeamento e realização de um levantamento fotogramétrico (LF) com VANT, no processamento das imagens recolhidas através de um *software* para processamento fotogramétrico e na análise dos produtos derivados.

O levantamento fotogramétrico aéreo com VANT, foi realizado em colaboração com o Centro de Investigação Naval (CINAV), na mesma altura, foi também realizado um LT com uma estação total e *laser scanner*, no âmbito de uma demonstração de capacidades pela empresa Emílio de Azevedo Campos, S.A. - Topografia.

#### 3.1. Levantamento Fotogramétrico Aéreo

O VANT utilizado no LF foi o Phantom 3 Pro, quadricóptero. O Phantom 3 está equipado de origem com câmara digital - FC300X (caraterísticas técnicas da câmara estão apresentadas na Tabela I).

Tabela I. Caraterísticas da câmara FC300X

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC300X (3.61 mm)	4000x3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 $\mu$ m	No

O equipamento tem integrado sensores de posição e atitude que permitem a aquisição e processamento dos sinais de código dos satélites dos sistemas de posicionamento globais (*Global Positioning Satellite - GPS e Global Navigation Satellite System - GLONASS*), e os sinais de atitude adquiridos por sensores *Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)*. Estes têm a capacidade de medir a aceleração nos três eixos de rotação do VANT, permitindo assim a determinação da posição e a orientação do equipamento e das imagens adquiridas (DJI, s.d.).

##### 3.1.1. Planeamento dos trabalhos de campo e aquisição das imagens

O plano de voo e a realização do mesmo, foi efetuado com recurso a um *smarthphone* e com o *software DroneDeploy*. Foi realizado um voo cobrindo uma área de 47,4 m<sup>2</sup> no dia 14 de abril de 2018, durante o período da baixa-mar. O voo foi conduzido a uma

altura estimada de 28 m (o principal critério para a seleção da altura do voo foi a segurança do equipamento devido à presença de estruturas com desenvolvimento vertical na área do levantamento, e.g. grua e edifícios); com sobreposição de 60%; e um *ground pixel resolution (GPR)* de 1.36 cm.

##### 3.1.2. Processamento dos Dados

Do levantamento aéreo realizado pelo VANT, foram selecionadas 340 imagens para processamento. O processamento foi realizado com o *software Agisoft PhotoScan Professional vs.1.4* (versão Trial). Este *software* de fotogrametria permite o processamento de imagens digitais, através de algoritmos proprietários de automatização de processos e de correspondência automática de imagens.

O processamento fotogramétrico com o *Agisoft* pode ser realizado num fluxo de trabalho (Agisoft, 2018) definido através dos seguintes passos:

- *Importação e preparação dos dados*

Foi efetuada a importação das imagens selecionadas para processamento; tal como, dos parâmetros de calibração da câmara (informação que consta nos metadados de cada imagem, p.e. distância focal, coordenadas do ponto principal, dimensão do pixel, parâmetros da distorção radial e tangencial) e do respetivo datum (WGS84).

Foi realizada uma conversão do sistema de referência das imagens, WGS84 para o sistema pretendido, o ETRS89/PT-TM06 sistema de referência dos pontos coordenados no terreno.

O planeamento e a execução do levantamento, deu origem a uma boa sobreposição de imagens, com a maior parte da área de levantamento observada em mais de nove imagens (Fig. 2).

- *Processo de orientação das imagens*

Foi realizado um alinhamento automático das imagens, de precisão média, com base na localização e correspondência de pontos homólogos em pares de imagens estereoscópicas, e na determinação da posição da câmara para cada imagem, com base nos parâmetros de calibração da câmara. Como resultado deste processamento obteve-se uma nuvem de pontos esparsa e a junção das imagens.

- *Identificação dos pontos fotogramétricos*

Com o objetivo de fixar o mosaico de imagens ao terreno foi realizado o pós-processamento das imagens com recurso a cinco pontos fotogramétricos (PFs) (Fig. 3). Os PFs fazem parte da rede local da base hidrográfica e foram coordenados por método *Global Navigation and Satellite System (GNSS)*, no sistema de referência ETRS89/PT-TM06, e por nivelamento geométrico, o sistema referência vertical adotado foi o nível médio (NM.). Os PFs utilizados apresentam precisão horizontal inferior a 3 cm e vertical inferior a 0.8 cm, compatíveis com o rigor

exigido no processo. Para facilitar a identificação dos PFs nas imagens, foram colocadas chapas em acrílico (de cor cinza e forma quadrada) sobre os mesmos no terreno, antes da realização do voo.

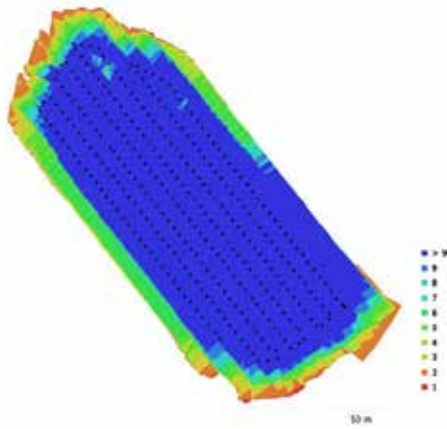


Fig. 2. Posição da câmara e sobreposição das imagens.

Os PFs estabelecem uma relação entre as imagens e o terreno, com elevado rigor, a partir das coordenadas do ponto a utilizar. Desta forma é possível realizar o ajustamento das imagens, em que todas as coordenadas dos pixéis das imagens serão corrigidas através de coordenadas conhecidas no terreno.



Fig. 3. Localização dos PFs e erros associados.

- *Processo de geração da nuvem de pontos densa*

Com base na posição relativa de cada câmara foi possível determinar a informação de profundidade, gerando uma nuvem de pontos densa, com 16.971.716 pontos (Fig. 4).

A nuvem de pontos gerada foi exportada para um ficheiro no formato LAS (*point cloud data*), para posterior comparação com outros produtos.

- *Geração do modelo digital de superfície e da ortofoto*

A nuvem de pontos obtida, no passo anterior, permitiu gerar o modelo digital de superfície (MDS) para a área do levantamento (Fig. 5) e a ortofoto.



Fig. 4. Nuvem de pontos densa.

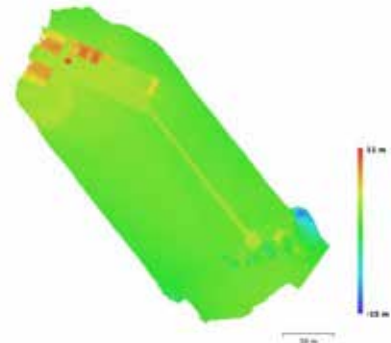


Fig. 5. Modelo digital de superfície obtido a partir das imagens.

O MDS obtido apresenta uma resolução espacial de 5.45 cm, com uma densidade média de 337 pontos por  $m^2$ .

### 3.2. Levantamento Topográfico com Laser Scan

O levantamento topográfico, foi realizado com o equipamento Trimble® SX10, equipado com *tablet* de campo com *software Trimble Access™*, que combina as valências de uma estação total e de um *laser scan* (Fig. 7), permitindo também a aquisição de imagens.



Fig. 6. LT na BHA com o Trimble SX10.

Para apoio ao LT, foram utilizados 5 pontos coordenados no terreno, no sistema de referência ETRS89/PT-TM06, para realizar a respetiva georreferenciação e orientação dos estacionamentos a efetuar. A área coberta, por este levantamento, foi superior à área do levantamento aéreo. Foram efetuados 3 estacionamentos, mas apenas o último cobre a área de interesse. Neste estacionamento foram realizados 3 varrimentos laser, um varrimento geral com duração de 7 minutos, outro para a fachada principal do edifício da Brigada Hidrográfica, com um espaçamento de 9 mm entre pontos para uma distância de 34 m (duração de 12 minutos), e um terceiro varrimento, a cobrir a zona de lodo intertidal e o cais (duração de 37 minutos) com um

espaçamento de 3 cm entre pontos para uma distância de 100 m.

Os dados obtidos nos 3 estacionamentos, foram transferidos do *tablet* de campo para um computador. Tendo sido transferido um ficheiro de trabalho (com extensão \*.job), a pasta com as imagens adquiridas e os dados de varredura 3D obtidos em campo. Foi possível obter 33.5 milhões de pontos em campo, com coordenadas X, Y e Z, cujos valores foram obtidos em tempo real.

Os dados foram importados no *software Trimble Business Center (TBC)*, no processo da importação foi realizada a junção das várias nuvens de pontos e atribuída a respetiva cor (cada ponto tem informação RGB associada ao objeto do terreno) (Fig. 7). A nuvem de pontos final já se encontra georreferenciada.



Fig. 7. Nuvem de pontos obtida com o Trimble SX10.

#### 4. RESULTADOS

A avaliação da qualidade posicional dos resultados da fotogrametria por VANT foi realizada através da comparação dos produtos derivados, com informação de referência recolhida por metodologias GNSS.

Como limiar de incertezas admissíveis, considera-se os 50 cm de incerteza horizontal previstos na NT.HI.01 para pontos de apoio e pontos hidrográficos (Instituto Hidrográfico, 2008). Outra referência relevante são as Especificações Técnicas do Modelo Topográfico MTop-ET-V0.4 (em fase de aprovação pela Direção-Geral do Território (DGT)). No MTop é considerado uma exatidão de 30 cm para Ndd1 (Tabela II) correspondente a cartografia à escala 1/2 000. (DGT, 2018)

Tabela II. Exatidão posicional dos objetos vetoriais do MTop

	Nível de detalhe	
	Ndd1	Ndd2
Exatidão posicional planimétrica	0,30 m	1,50 m
Exatidão posicional altimétrica	0,40 m	1,70 m

Através da análise do erro médio quadrático (EMQ) dos pontos de controlo (Tabela III), verifica-se que o ajustamento do mosaico com base nos PFs permitiu obter valores sub-decimétricos. Uma análise mais fina da qualidade do posicionamento obrigará a determinar as coordenadas de mais pontos de apoio e à determinação do EMQ associado aos mesmos.

Tabela III. Erro médio quadrático determinado nos PFs

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	0.458721	0.612569	6.75489	0.765288	6.7981

A ortofoto gerada no processo foi comparada com o levantamento topográfico realizado na mesma zona, verificando-se que a diferença de posicionamento entre as estruturas representadas na ortofoto e as linhas recolhidas no levantamento, apresentam valores inferiores a 50 cm (Fig. 8).



Fig. 8. Sobreposição do levantamento topográfico por GNSS à ortofoto produzida.

#### 5. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida permitiu concluir que é possível utilizar a fotogrametria por VANT como uma alternativa aos LT tradicionais.

Os LT por VANT cumprem os requisitos, de posicionamento planimétrico e altimétrico, exigidos no normativo técnico e adicionam a capacidade de gerar nuvens de pontos densas, modelos digitais de superfície de alta resolução e informação de contexto sobre os objetos na área do levantamento.

A capacidade de sobrevoar zonas de fronteira entre terra/água de difícil acesso, muitas vezes perigosas, permite dispensar a necessidade de acesso de topógrafos a essas zonas, permitindo a recolha de dados na zona intertidal de uma forma remota.

No âmbito do trabalho futuro considera-se ser necessário utilizar a aprendizagem que foi feita neste trabalho para melhorar o processo nas suas diferentes fases, no planeamento dos levantamentos, na aquisição e no processamento dos dados, torna-se necessário considerar metodologias de controlo de qualidade e propagação de incerteza que possibilitem a interligação destes modelos de superfície com os modelos batimétricos.

#### REFERÊNCIAS

- Agisoft 2018. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.4.
- DGT 2018. Especificações técnicas de cartografia e informação geográfica de referência.
- DJI. s.d. *Phantom 3 Professional* [Em linha]. Disponível em: <https://www.dji.com/phantom-3-pro/info#downloads> [Consult. maio 2018].
- NT.HI.01 - Norma Técnica para o planeamento, execução e processamento de levantamentos hidrográficos 2008.
- J. Chris McGlone 2013. *Manual of Photogrammetry*. 6 ed: ASPRS.

# Uma nova técnica para determinar a batimetria intertidal com imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2

J. Catalão

(1) IDL, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa. E-mail: [jcfernandes@ciencias.ulisboa.pt](mailto:jcfernandes@ciencias.ulisboa.pt)

**Resumo:** Nesta comunicação é apresentado uma nova técnica para estimar a batimetria intertidal a partir de imagens multiespectrais. O racional da técnica é baseado na variabilidade temporal da refletância espectral da água e da superfície intertidal e da sua correlação com o nível de maré. O comportamento espectral da água é caracterizado pela absorção nos comprimentos de onda maiores que o infravermelho. Deste modo, recorrendo ao canal do infravermelho (IV) próximo, é expectável que os pixéis da zona intertidal tenham uma elevada variabilidade temporal por estarem expostas ao regime de maré. A variabilidade da refletividade do IV no tempo é modelada por uma função sigmoide de três parâmetros em que o parâmetro de inflexão corresponde à elevação do pixel. A metodologia foi validada com dados do terreno no estuário do Tejo e na Ria Formosa usando para o efeito imagens do satélite Sentinel-2.

**Palavras-chave:** Intertidal, Batimetria, Multiespectral, Sentinel-2.

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da batimetria em zonas costeiras é fundamental para a gestão e planeamento do litoral. O ambiente costeiro é um sistema complexo exposto a forças externas que atuam a diferentes escalas temporais e espaciais que provocam alterações na morfologia costeira. Aos processos naturais de curto período e elevada energia, como as tempestades, acrescem os processos seculares de origem climática ligados à subida do nível médio do mar. O aumento da taxa de subida do nível médio do mar, observado na última década, tem exercido uma ação continuada sobre o sistema costeiro colocando em risco pessoas e bens. É por isso imperioso um sistema de monitorização do litoral, de abrangência global/regional e regularidade temporal, que permita a deteção e mapeamento das alterações, em quase tempo real, e que permita a implementação de ações de mitigação ou de socorro. Os satélites de observação da Terra, com a sua visão sinóptica e repetibilidade espacial e temporal, são presentemente um instrumento atrativo na monitorização ambiental e em particular do sistema costeiro. Com o aumento da resolução espectral e espacial das missões de observação da Terra, tem aumentado o interesse na sua aplicação à monitorização dos processos costeiros e em particular à derivação e batimetria.

A derivação da batimetria com imagens multiespectrais é baseada num modelo de transferência radiativa que incorpora as propriedades de refletância espectral da água (Lyzenga, 1985; Stumpf *et al.*, 2003) ou no contraste água-terra combinado com um modelo de maré, conhecido por método da linha de água, *waterline method* (Mason *et al.*, 1997). A primeira abordagem, de natureza física, recorre a um conjunto de dados de profundidade para calibração do modelo no caso do método proposto por

Stumpf *et al.* (2003). O método da linha de água consiste na delimitação da fronteira entre o corpo de água e a parte exposta da zona intertidal numa sequência de imagens adquiridas a diferentes níveis de maré. Assumindo que a linha de água é uma equipotencial, linha de igual elevação, o modelo de elevação/batimetria é formado pela justaposição de todas as linhas extraídas da série temporal de imagens. Este método tem a vantagem de não requerer dados complementares de profundidade e de poder ser implementado em imagens multiespectrais e imagens SAR (Catalão and Nico, 2016). A principal vantagem dos sistemas SAR sobre os sensores multiespectrais é a sua capacidade de observar a terra em qualquer condição atmosférica e em qualquer condição e iluminação solar (dia e noite).

A extração da linha de água pode ser considerada como um problema de classificação de duas classes, ou um problema de definição do limiar de separabilidade entre água e não água. O contraste terra/água é dependente de vários fatores internos como o ângulo de incidência, a resolução radiométrica e espacial do sensor multiespectral e fatores externos como o vento, a ondulação, quantidade de partículas em suspensão ou a quantidade de algas, que influenciam a refletância da água e da zona intertidal. Por estes motivos, nem sempre é possível a extração da linha de água com qualidade suficiente, entenda-se com continuidade espacial e sem interseção com outras linhas, para ser usada no modelo digital de elevação. A natureza variável dos fatores externos condiciona a definição de um limiar de separabilidade terra/água único para a totalidade da série temporal de imagens. Também é reconhecido que o método da linha de água subestima o fluxo de água em pequenos canais e não identifica pequenos corpos de água ou pequenas ilhas afetando a exatidão do modelo de batimetria. Os algoritmos de

extração da linha de água operam em imagens 2D, explorando relações espaciais entre a água e a zona intertidal, não entrando em conta de forma explícita com a informação temporal inerente a uma série temporal de imagens multiespectrais.

Nesta comunicação apresentamos uma nova técnica para determinar a batimetria intertidal que se baseia na análise da variabilidade temporal da refletividade espectral da água na zona do infravermelho. A proposta é baseada na análise pixel-a-pixel da variação temporal da refletividade da água e da estimativa de parâmetros de uma função logística (sigmoide) que transforma a refletância espectral em altitudes. Para cada pixel são estimados os parâmetros da função logística que minimiza uma função custo definida com os dados de refletância e de altura de maré.

A estrutura do artigo é a seguinte: a secção 2 é dedicada a descrever a metodologia, na secção 3 são apresentados os resultados da aplicação do novo algoritmo a uma sequência de imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2 em duas zonas teste, o estuário do Tejo e a Ria Formosa e na última secção são apresentadas as conclusões.

## 2. METODOLOGIA

As regiões estuarinas são caracterizadas por um baixo relevo e reduzido declive, com várias zonas lodosas e pequenos canais e geralmente com vegetação esparsa. As regiões expostas ao regime de maré, estuários e praias, são inundadas duas vezes por dia a diferentes níveis altimétricos de acordo com o ciclo local de maré. A superfície exposta ao regime de maré, zona intertidal, tem uma resposta espectral (refletância espectral) variável no período de um ciclo de maré, alternando entre a forte absorção no infravermelho na preia-mar e na reflexão moderada no infravermelho na baixa-mar. A amplitude da variação da refletividade no infravermelho é função da densidade da vegetação ou algas na zona intertidal.

A técnica que propomos, como alternativa ao método da linha de água, baseia-se na premissa que a variação da refletividade de um pixel (ou região) na banda do infravermelho ao longo de uma série temporal de imagens multiespectrais está relacionado com a altitude do pixel. De facto, um pixel na zona superior intertidal terá uma maior refletividade no infravermelho e durante mais tempo que um pixel na zona inferior intertidal que apresentará uma variação significativa na refletividade ao longo do tempo. A janela temporal deverá ser suficientemente curta de modo que a morfologia intertidal não sofra alterações significativas no período em análise. O algoritmo é dividido em três passos: 1) pré-processamento e seleção dos pixels da zona intertidal; 2) análise logística; e 3) derivação do modelo topo-batimétrico.

### 2.1. Pré-processamento

Neste módulo as imagens são convertidas em refletâncias referidas ao topo da atmosfera, corrigidas e georreferenciadas. A imagem adquirida na data de menor maré baixa é selecionada como imagem de referência para o correção. O índice da água proposto por McFeeters (1996), *Normalized Difference Water Index*, NDWI, permite discriminar entre pixels na água e pixels em terra mediante a definição de um limiar ajustado localmente. A análise da variabilidade temporal do NDWI é usada para discriminar entre as diferentes ocupações do solo. A variabilidade temporal de cada pixel é calculada usando a expressão:

$$\sigma(x, y) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (NDWI_i - \overline{NDWI})^2} \quad (1)$$

Em que  $\overline{NDWI}$  é a média temporal do NDWI do pixel (x,y). Como o interesse recai sobre a zona intertidal, definimos um problema de classificação de três classes; água, intertidal e terra. A classe água é caracterizada por uma baixa variabilidade temporal e um valor elevado de NDWI quando comparada com a zona intertidal. A classe terra é também caracterizada por uma baixa variabilidade temporal, mas ao contrário da água é esperado que o valor do NDWI seja menor que o valor da zona intertidal. A principal característica diferenciadora da classe intertidal é a elevada variabilidade temporal.

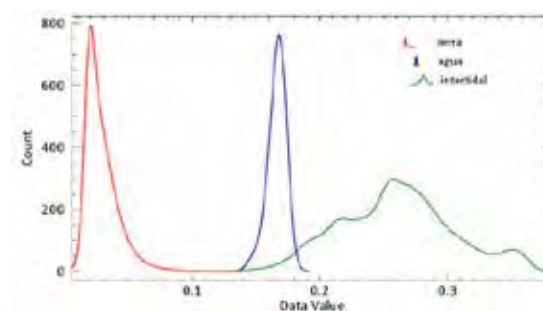


Fig. 1. Variabilidade temporal do NDWI para as três classes de ocupação do solo: água (azul), intertidal (verde) e terra (vermelho).

Na fig. 1 é apresentado o histograma da variabilidade temporal das três classes. As três classes apresentam um elevado grau de desagregação que permite a identificação com algum nível de confiança dos pixels da classe intertidal. Contudo, observa-se uma ligeira sobreposição entre a classe água e a classe intertidal que pode ser resolvida com a informação do valor do NDWI que é superior na água. Os pixels com variabilidade temporal superior a 0,17, são supostamente pixels pertencentes à classe intertidal e considerados como pixels candidatos a posterior análise regressão logística. Dada a ligeira sobreposição entre as classes água e intertidal, alguns pixels da classe água serão também considerados como pixels candidatos. Neste caso, deverá ser implementado um mecanismo de despiste de pixels não pertencentes à classe intertidal. A seleção do conjunto de pixels candidatos tem como propósito

único a redução do número de pixéis a analisar na análise logística. Por isso, será sempre preferível a seleção em excesso dos pixéis candidatos, sabendo que ao nível da análise logística alguns destes pixéis serão excluídos.

## 2.2 Análise Logística

Os pixéis pertencentes à zona intertidal têm uma característica que os permite diferenciar dos outros pixéis: são pixéis em que a variabilidade temporal da refletância, na banda do infravermelho, está correlacionada com a altura de maré. A variação temporal da refletância pode ser modelada com a função logística (Catalão e Nico, 2017):

$$\rho_i(x, y) = \frac{k}{1 + e^{-a(h_i - h_t)}} + LowLim \quad i = 1, \dots, M$$

em que para cada pixel,  $(x, y)$  são as coordenadas imagem,  $h_t$  é a altitude do terreno na posição  $(x, y)$ ,  $h_i$  é a altura de maré e  $\rho_i$  é a refletância na banda do infravermelho. A função logística é definida por dois parâmetros: **a** e **k**. O parâmetro **a** está relacionado com o declive (*steepness*) da função logística (se positivo a função aumenta com a altura, se negativo a função diminui com a altura), enquanto o parâmetro **k** está relacionado com a assíntota superior da função. Estes dois parâmetros controlam a forma da função logística e são estimadas por ajuste aos valores de refletância de cada pixel. O objetivo da análise logística é estimar os dois parâmetros (**a** e **k**) da função logística. O parâmetro **a** pode ser definido em função do regime de maré e da topografia reduzindo-se o número de parâmetros a estimar. Como a função não é linearizável, a solução para os dois parâmetros é obtida por pesquisa no espaço bidimensional da solução do mínimo da função custo:

$$E = \sum_{i=1}^M \left\{ h_i - h_t + \frac{1}{a} \ln \left( \frac{\rho_i}{k - \rho_i} \right) \right\}^2$$

A precisão da estimativa da altitude do pixel está dependente do número de imagens, da amostra de valores de maré e da amplitude de maré.

A regressão logística é aplicada a todos os pixéis candidatos resultando na estimativa para cada pixel de altitude e função custo. Independentemente da classe a que o pixel pertence, a altitude é estimada entre os valores mínimo e máximos de maré. Como consequência, será atribuída uma altitude errada aos pixéis fora da zona intertidal. Estes pixéis não apresentam um comportamento típico de zona intertidal com um decaimento em função da altura de maré e consequentemente o ajuste da função logística aos dados é relativamente baixo, ou seja ao valor da função custo é elevado. Para detetar e selecionar os pixéis da classe intertidal foi usado um índice de forma da curva logística, o índice de saturação. Este índice permite discriminar as funções logísticas em forma de S das funções em forma de rampa que não refletem a correlação entre reflectancia e a altura de maré. O índice de saturação é definido como:

$$sat = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\rho_{max} + \rho_{min}}$$

Em  $\rho_{max}$  e  $\rho_{min}$  são os valores das assíntotas máxima e mínima da curva logística. O índice de saturação é usado para eliminar os pixéis em que a refletância não está correlacionada com a maré. Neste caso, os pixéis com valores de índice de saturação maior que 0.4 são considerados pixéis válidos para efeitos de cálculo do modelo topobatimétrico.

## 2.3 Derivação do modelo de batimetria

O resultado do passo anterior é uma nuvem de pontos 3D com as coordenadas geográficas (latitude longitude) e a altitude no sistema de referência das marés. A nuvem de pontos é interpolada com um interpolador de baixo grau com critério de seleção de pontos restrito a 2 vezes a resolução espacial da imagem, construindo-se uma grelha do modelo de superfície da zona intertidal.

## 3. RESULTADOS

O algoritmo foi testado no estuário do Tejo e na Ria Formosa. As duas áreas são caracterizadas por extensas zonas intertidais com perfil suave, zonas de sapal, praias e na Ria Formosa um sistema de lhas barreira que separa a ria do oceano.

Neste estudo foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 adquiridas entre julho e setembro de 2017. As imagens são de nível 1C, com correção atmosférica ao topo da atmosfera e estão georreferenciadas no sistema cartográfico WGS84/UTM29N. Foram usadas as bandas do verde (B3) e do infravermelho próximo (B8) para o cálculo do NDWI e a banda do infravermelho próximo (B8) para a análise logística. Ambas as bandas têm uma resolução espacial de 10 metro. O nível de maré foi extraído do modelo de maré do Instituto Hidrográfico e complementados com a informação horária fornecida por Antunes (2011). Verificamos que a maioria das imagens é adquirida na preia-mar, a baixa-mar é insuficientemente representada e que há intervalos de altura de maré sem qualquer observação. Esta limitação é dependente da hora de aquisição de cada missão e também do regime local de maré.

A variabilidade temporal de cada pixel foi calculada usando o desvio padrão temporal do NDWI (formulada 1). O limiar de seleção dos pixéis candidatos foi definido com base na análise do histograma da variabilidade temporal para o estuário do Tejo e da Ria Formosa, apresentado na figura 1, e decidido adotar o valor de 0.10 e de 0.17, respetivamente. A escolha do limiar para a seleção dos pixéis candidatos deverá procurar minimizar o erro de omissão de pixéis na zona intertidal. Os pixéis candidatos são posteriormente analisados usando a regressão logística de acordo com a metodologia explicada anteriormente.



Para cada pixel, foi estimada a altitude, o limite superior da função logística e o índice de saturação. O resultado do algoritmo é um conjunto de pontos 3D, latitude, longitude e altitude referida ao sistema local de maré (zero hidrográfico). A nuvem de pontos é interpolada para gerar uma grelha regular de elevação/profundidade usando o interpolador do inverso do quadrado da distância. Foi usado o método do quadrante para a seleção de pontos com o raio de 20 m (2 vezes a resolução da célula) implementando o critério de ponto de grelha branco para os pixels com mais de dois quadrantes sem observação. A resolução espacial de grelha final é de 10 m. O modelo de elevação do estuário do Tejo e da Ria Formosa são apresentadas nas figuras 2 e 3. Os valores máximos e mínimos de elevação são limitados pela máxima preia-mar e mínima baixa-mar registados neste período. As imagens do satélite Sentinel-2 são adquiridas às 11:300 UTC limitando a medição da menor maré anual. Não interpretamos como uma limitação do método, uma vez que qualquer método multitemporal que use imagens de satélite estará condicionado pela hora de passagem do satélite.

Nas duas áreas teste, o modelo de elevação reflete a morfologia de pequena escala da zona intertidal. São evidenciados e corretamente localizados os elementos morfológicos relevantes como canais, diques e sapal. Na ilha de Faro é observada uma alteração morfológica relevante com deslocamento da barra na direção oeste cerca de 1800 metros. O recurso a imagens de satélite permitiu não só detetar a alteração do local da barra como medir as alterações morfológicas ocorridas na área de influência da barra. Para efeitos de validação do modelo topo-batimétrico foi usado um conjunto de sondas medidas na Baía do Seixal (fornecidas pelo IH) e um modelo de elevação derivado de medições de lidar aéreo na Ilha da Culatra. A comparação entre os dois conjuntos de dados foi limitada à amplitude de maré observada neste período, ou seja entre 1.23 m e 3.47 m no Tejo e 1.17m e 3.28 m na Culatra. Nesta amplitude de maré, a média dos resíduos é de -0.38m e de -0.82m e o desvio padrão de 0.20 m e de 0.54m, no estuário do Tejo e na Culatra, respetivamente. No caso do estuário do Tejo, as maiores diferenças são observadas junto aos limites do canal de navegação onde surgem os maiores declives batimétricos. No caso da Culatra, os maiores resíduos ocorrem em zonas de alteração morfológica recente. Estas diferenças podem ser atribuídas à diferença temporal entre os levantamentos e a imagem de satélite (4 e 7 anos de diferença) ou a erros de geolocalização da imagem. As zonas de maior declive altimétrico são as mais sensíveis a erros de posicionamento.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentámos uma técnica nova para derivar a batimetria intertidal a partir de imagens de satélite multiespectrais. A principal vantagem da

técnica proposta reside na possibilidade de ser aplicado a imagens multiespectrais e imagens SAR, na automatização do processo, não requerendo a intervenção do operador, e na precisão do modelo batimétrico derivado, na ordem dos 20-30 cm.

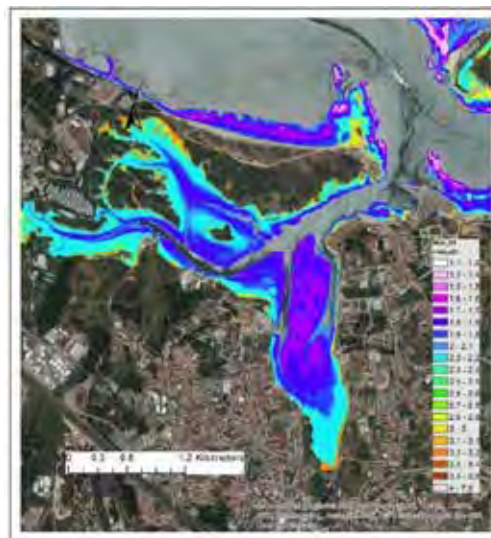


Fig. 2. Pormenor do modelo batimétrico do estuário do Tejo na região da baía do Seixal.

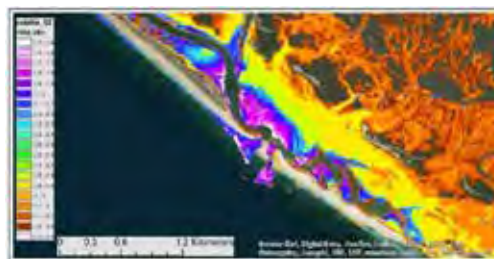


Fig. 3. Pormenor do modelo batimétrico da Ria Formosa, barra da ilha de Faro.

#### REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2011). Monitoring sea level change at Cascais tide gauge. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 870-874, 2011.
- Catalão, J., Nico, G. (2017). Multitemporal backscattering logistic analysis for intertidal bathymetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Lyzenga, D. R. (1985). Shallow-water bathymetry using combined LiDAR and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 115-125.
- Mason, D.C. and Davenport, I. (1996). Accurate and Efficient Determination of the Shoreline in ERS-1 SAR images *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), 1243-1253.
- McFeeters, S.K. (2007). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International J. of R. Sensing*, 17:7, 1425-1432.
- Stumpf, R. P., et al. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Lim. and Ocean.*, 48(1), 547-56.

# Co-ReSyF SAR-bathymetry application: algorithm testing and performance

F. Sancho (1), F. Birrien (1) and A. Azevedo (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. E- mail: [fsancho@lnec.pt](mailto:fsancho@lnec.pt)

**Abstract:** The present work focuses on the development of an application within Co-ReSyF (Coastal waters Research Synergy Framework) platform, that aims at deriving coastal bathymetries from Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite images, with clear swell wave signatures. The method is based on estimating, first, the predominant wavelength at user-defined grid points from the computation of the wavenumber spectra via 2D Fast Fourier Transform (FFT) of overlapping sub-images at each point. The underneath depth is then estimated using the wavenumber dispersion relationship, from intermediate to shallow waters. Results of the estimated depths within a region of the continental shelf off Aveiro is presented, showing reasonable agreement with the reference surveyed bathymetry, in the regions of depth between 10 and 60 metres. The agreement then deteriorates as depth increases until the wave propagation “deep water limit.

**Key words:** Satellite SAR images; Coastal bathymetry; Sentinel-1; Depth inversion; Wavenumber

## 1. INTRODUCTION

Coastal areas are exposed and subject to several natural risks, and represent a region where the majority of the world’s population, infrastructures and economic activities are concentrated. Consequently, the National Authorities frequently highlight the need to monitor the coastal shelf bathymetry.

Simultaneously, Earth Observation (EO) from space produces a large amount of daily images all over the world, including the oceans and coastal areas. One example of this constant EO monitoring relates to ocean and coastal altimetry, allowing to accurately measure the sea level variation since 1993 (e.g., Church *et al.*, 2013). New generations of airborne and spaceborne instruments have been developed. EO Satellites equipped with Synthetic Aperture Radar (SAR) now provide High Resolution (HR) (<10m) series of images and global coverage even for remote areas.

In highly energetic sandy coasts, the underwater morphology can change significantly at storm timescales, compatible to satellite revisiting periods. For instance, the European Space Agency two-satellite Sentinel-1 constellation offers a 6-day exact repeat cycle at the equator, but a much shorter revisiting period (1-2 days) at higher latitudes (Sentinel.esa.int, 2018). These morphological rapid changes cannot be measured by traditional surveys, not only for economic reasons but also because surveying vessels usually cannot operate safely in the wave shoaling and breaking regions under storm conditions. These restrictions limit the emergency responses and even delay the medium to long-term management actions, for lack of detailed and updated information.

Thus, over the last two decades, EO has become a method for monitoring extensive coastal areas, as an alternative to direct in-situ surveys, and even airborne (LIDAR) surveys. Its low cost (per unit area) can be highly rewarding when compared with traditional surveys, providing one can obtain reliable and high-resolution bathymetry datasets.

Alternatively, coastal beach-based video imagery has been successfully used to monitor coastal sandbars and shoreline behaviours and to estimate nearshore bathymetries (e.g. Holman *et al.*, 2013). This technic is generally limited by the image footprint of the coastal video cameras, to distances shorter than ~1 km across the shore (Holman *et al.*, 2013), usually covering the surfzone and part of the wave shoaling zone. More recently, UAV-based bathymetry estimations (Matsuba and Sato, 2018) have extended seawards the nearshore range of the video-monitoring stations.

On the other hand, processed (level 1) EO HR or VHR (Very High Resolution) SAR images often show clear ocean swell signatures over the deep ocean and shelf regions, which are potentially interesting for depth inversion purposes (e.g. Brusch *et al.*, 2011). Depth inversion using such images is theoretically simple for the regions where wave propagation starts to be affected by the bottom topography, that is, typically the region covered from the continental shelf break towards the shoaling zone, for long-period swell waves. Hence, SAR-derived bathymetry would potentially complement and extend video- and UAV-derived bathymetric surveys offshore of the shoaling zone to the inner continental shelf. A recent review on available methodologies and their possible limitations for coastal bathymetry determination are described in Aarnik (2017).

This study summarises the Co-ReSyF research framework and details the SAR-bathymetry estimation module as suggested by Sancho *et al.* (2017). The algorithm workflow, the processing steps and the image selection protocols are briefly presented. It further highlights the challenges related to estimating the swell wave length and direction from HR Sentinel-1 images (ground resolution ~10m), and shows the estimated depths for selected areas at the continental shelves off Aveiro.

## 2. Co-ReSyF RESEARCH FRAMEWORK

The Co-ReSyF (Coastal waters Research Synergy Framework) project (<http://co-resyf.eu/>) aims to facilitate access to EO data and various processing tools to the coastal and oceanic research community. Co-ReSyF thus delivers a computational, on-line, web-based platform (soon available at <https://geoportale.coresyf.eu/>) supporting the development and use of research applications.

The Co-ReSyF project implements a dedicated data access and processing infrastructure, with automated tools, methods and standards to support research applications using EO data for monitoring coastal waters. Through Co-ReSyF's collaborative front end, even inexperienced researchers in EO will be able to upload their applications to the system to compose and configure processing chains for easy deployment on the cloud infrastructure. They will be able to accelerate the development of high-performing applications taking full advantage of the scalability of resources available in the cloud framework. The system's facilities and tools, optimized for distributed processing, include EO data access catalogues, discovery and retrieval tools, as well as a number of pre-processing tools and toolboxes for manipulating EO data. Advanced users will also be able to go further and take full control of the processing chains and algorithms by having access to the cloud back-end, and to further optimize their applications for fast deployment for big data access and processing.

Seven research applications will be implemented into the Co-ReSyF platform, namely: coastal altimetry; Optical-bathymetry estimation; SAR-bathymetry estimation; vessel detection; oil spill detection; benthic classification and water quality from optical imagery; and hyper-temporal analysis of Sea Surface Temperature (SST) data from optical imagery.

The following section illustrates the development, validation and deployment into the Co-ReSyF platform of a coastal shelf bathymetry estimation application, from Sentinel-1 SAR images.

## 3. BATHYMETRY ESTIMATION METHOD

The SAR-bathymetry application aims at deriving coastal bathymetry from SAR satellite data. The application is based on the detection of the swell wave pattern in SAR images, from which local wavelengths are determined, and using the linear wave-dispersion

relationship one obtains the underneath water depths. The complete methodology further includes some pre-processing steps and image selection protocols. A summary of the main processing chain is given in Figure 1.

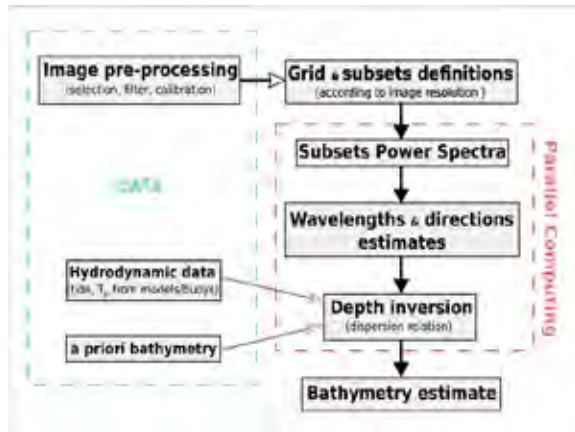


Fig. 1. Simplified flow chart of the SAR-bathymetry inversion algorithm deployed in the Co-ReSyF platform.

Initially, a SAR-image is selected and retrieved from the Co-ReSyF catalogue. For each SAR-image, a pre-check image adequacy is verified, based on additional, external, information from wind field data (able to produce the Bragg scattering), and wave climate data (to identify swell conditions). Estimated (hindcasted) wind and wave fields can be fetched from, e.g., the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) re-analysis, and the COPERNICUS Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) datasets.

Each selected SAR images are calibrated (sigma0 band), filtered (Speckle filtering) and geo-referenced using the SNAP (Sentinel Application Platform) pre-processing toolbox. An area of interest (AOI) is subsequently defined by the user according to the zone to be studied.

The method then requires a computational grid (regular or unstructured) to be preliminarily generated, according to the AOI, with a resolution defined by the user (typically of the order of 100-2000 m). The inspection of the existing bathymetric information (from external sources, such as the EMODNET, <http://www.emodnet.eu/bathymetry>) for that site will allow to infer whether the AOI contains “deep water” (depth independent) points or just depth-dependent points, information that will be used in the image-FFT calculation.

The overall inversion algorithm accounts for how much data (model/buoys) is available in order to constrain physical ranges of the incident wave parameters ( $T_p$ , direction) and is parallelized for computational efficiency.

When SAR images with clear swell signatures have been pre-processed and a computational grid defined accordingly, the global inversion step is performed

using cloud parallel computing to enhance the high scalability potential of the method (Figure 1).

Incident wave directions are first estimated at each grid point via a series of overlapping sub-images (typically 1-2 km wide) and subsequent 2D-image power spectral estimates (i.e. 2D FFTs). Each individual sub-scene allows to compute a local peak wavelength through 1D FFT of an ensemble of directional 1D wave cross-sections. The ensemble of local peak wavelengths, computed from these pseudo-waves series, are then averaged to estimate a mean peak wavelength at each grid point.

For each grid point, the wave dispersion relation,

$$\lambda = \frac{gT_p^2}{2\pi} \tanh(kh) = \lambda_0 \tanh(kh)$$

is subsequently inverted to estimate the local depth,  $h$ , provided the wave (peak) period,  $T_p$ , is known (e.g., from a local measurement from wave model hindcasts or directly estimated from the image):

$$h = \frac{1}{k} \tanh^{-1} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)$$

Alternatively, if an a priori bathymetry is available, a minimization method based on onshore propagation

of an ensemble of deep water wavelength,  $\lambda_0$ , distributions and their overall match with the local counterpart is used to retrieve the local depth.

Also, if “deep water” locations are expected within the AOI, the wave peak period is directly estimated from the averaged image-computed wavenumber,  $\lambda_0$ , at multiple deep water grid-points. This information is found to be crucial, as any miscalculation in  $\lambda_0$  can lead, due to the nature of the inverse hyperbolic tangent function, to significant errors in the determination of  $h$ . It is found that the method is limited to points where  $\lambda/\lambda_0 < 0.99$ , although in some cases a lower limit (0.90) may be recommended.

Finally, depth data are gathered to produce the final bathymetry product. If needed, a Kalman Filter may provide a smoother bathymetry map.

#### 4. RESULTS

Results of the estimated depths at the coastal region offshore Aveiro, from Espinho to Praia de Mira, are shown in Figure 2a. This figure shows a colour scheme representing the depth at each grid point of a quadrangular grid of size equal to 1000 m.

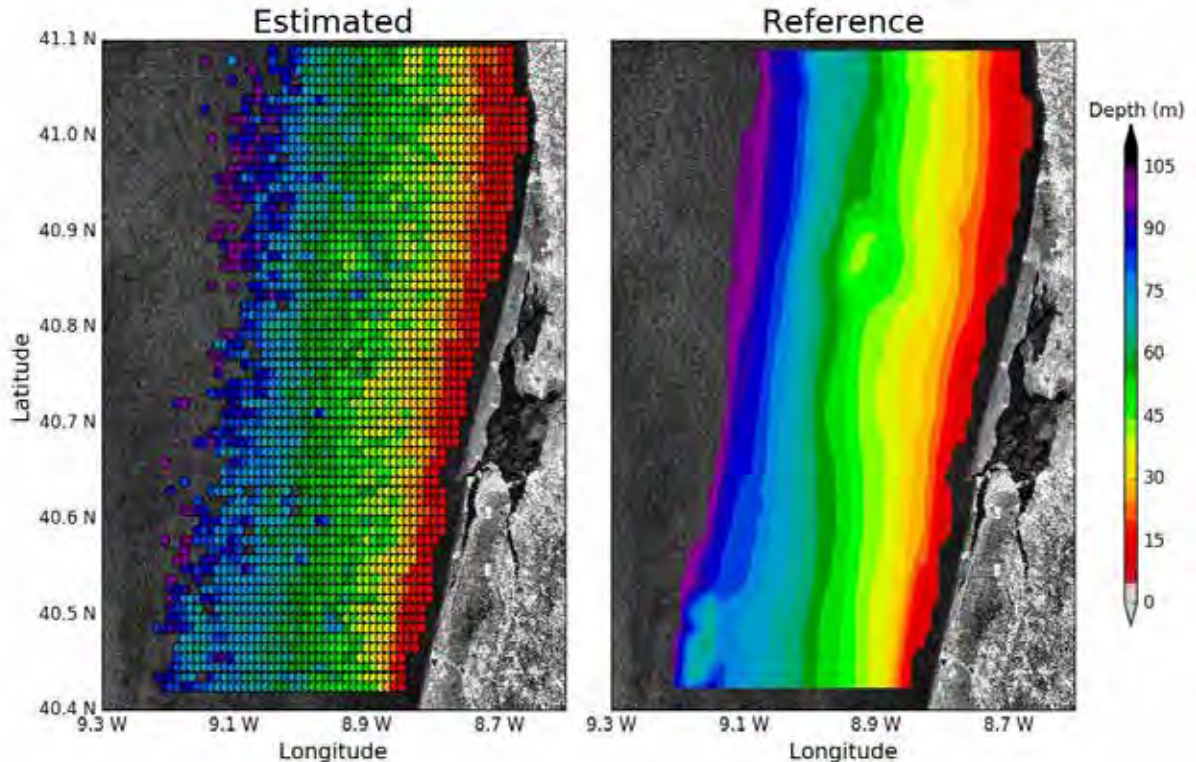


Fig. 2. SAR-image estimated (a) and reference (from EMODNET database) (b) bathymetric map off the coast of Aveiro. Image reference: S1B\_IW\_GRDH\_ISDV\_20170131T183449\_20170131T183514\_004096\_007148\_CDB9.

The points within the AOI for which no colour is given (blank points) are either offshore ( $h > 105\text{m}$ ) or local areas where the method failed to estimate bathymetry, i.e., the local imagettes did not show a clear swell pattern and an ensemble-averaged

unambiguous peak wavelength could not be retrieved from the Spectral analysis. In some cases, this problem caused the estimated local wavelength,  $\lambda$ , to be larger than the estimated offshore wavelength,  $\lambda_0$ , impeding the retrieval of a solution to the inverted

dispersion relationship. These results were obtained considering an 1x1 km<sup>2</sup> imagette at each grid point. For the present SAR-image (visible in the background of Figure 2a and b), the estimated deep-water wavelength and wave peak period were 311.5m and 14.2s respectively.

Figure 2b shows, for comparison, the reference bathymetry from the EMODNET database. An overall good agreement is visible, despite the occurrence of a few outliers, with clearly wrong depths, at some grid points. Further, one observes that the outliers and blank points are almost inexistent in regions where  $h < 50$  m. Also, results show a good agreement, generally within  $\pm 5$  m, in shallower regions (with depth approx. smaller than 50 m). At depths closer to the deep water limit ( $h = \lambda_0/2$ ), of the order of 100 m, the errors and number of blank points are much greater. A thorough evaluation of the estimated bathymetry errors and validation of the methodology shall be published in the near future.

## 5. CONCLUSIONS

An algorithm to estimate coastal depths (from the wave breaking region to the “deep-water limit” in the sense of free-surface wind wave propagation properties) from SAR images was developed within the Co-ReSyF project. A brief description of the dedicated data access and processing infrastructure (or platform) developed within this project is given. The structure of the coastal SAR-bathymetry tool is outlined (Figure 1). A few details of the individual components/modules are presented and discussed, in light of the limitations regarding the application and inversion of the wave dispersion relationship.

The application of the algorithm for the coastal region of Aveiro yield promising results in intermediate to shallow waters, when comparing with the reference grid. The future processing of other images or the same region will enable to build a database of estimated depths and to perform a thorough statistical analysis in order to better infer on the retrieval errors and to evaluate long term trends.

## Acknowledgements

The Co-ReSyF project has received funding from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 687289. The authors acknowledge the Korean Aerospace Research Institute (KARI) and SI Imaging Services (SIIS) for providing KOMPSAT-5 images.

## REFERENCES

- Aarnik, J.L. (2017). *Bathymetry Mapping using Drone Imagery*. Coastal Engineering MSc Thesis, TUDelft, 89 pp.
- Brusch, S., Held, P., Lehner, S., Rosenthal, W., Pleskachevsky, A. (2011). Underwater bottom topography in coastal areas from TerraSAR-X data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, No. 16, 4527-4543, doi:10.1080/01431161.2010.489063.
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer D. and Unnikrishnan, A.S. (2013). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Holman, R., Plant, N., Holland, T. (2013). cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 118, 2595-2609, doi:10.1002/jgrc.20199, 2013.
- Lehner, S., Pleskachevsky, A., and Bruck, M. (2012). High-resolution satellite measurements of coastal wind field and sea state, *International Journal of Remote Sensing*, 33:23, 73377360, doi: 10.1080/01431161.2012.685975.
- Matsuba, Y., Sato, S. (2018). Nearshore bathymetry estimation using UAV. *Coastal Engineering Journal*, Published online: 08 Mar 2018, doi: 10.1080/21664250.2018.1436239.
- Sancho, F., Azevedo, A., Pinto, J.P., Lamas, L. (2017). Coastal waters Research Synergy Framework (Co-ReSyF): Project overview and SAR-bathymetry estimation. 4ª Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira | MEC2017, Livro de Resumos, 2017, Porto – Portugal.
- Sentinel.esa.int. (2018). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Revisit and Coverage - Sentinel Online*. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/revisit-and-coverage> [Accessed 4 May 2018].

# Melhoria da eficiência do processamento de dados batimétricos

P. Carvalho (1), T.G. Dias (2), C. Monteiro (3) e C.V. Marques (3)

- (1) Inst. Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. E-mail: [teixeira.carvalho@hidrografico.pt](mailto:teixeira.carvalho@hidrografico.pt)  
 (2) IUM - Instituto Universitário Militar, Marinha  
 (3) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal.

**Resumo:** Este trabalho teve como objetivo apresentar um procedimento que melhorasse a eficiência do processamento de dados batimétricos, otimizando a utilização do *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*, sem comprometer as especificações dos levantamentos hidrográficos. Neste sentido, foram propostas e testadas duas versões de um procedimento alternativo ao procedimento normalizado atualmente implementado no Instituto Hidrográfico. A validação do novo procedimento baseou-se em dois casos de estudo de levantamentos hidrográficos com especificações técnicas (ordens especial e 1a) e características físicas (fundos regular e irregular) distintas, realizados nos rios Douro e Tejo. Ambas as versões do procedimento proposto melhoraram consideravelmente o tempo consumido no processamento de dados, sendo que a versão A manteve a qualidade do procedimento normalizado e a versão B demonstrou ser adequada em situações de urgência ou em fundos superiores a 40 m.

**Palavras-chave:** levantamento hidrográfico, sondador multifeixe, modelo batimétrico, CUBE.

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução dos sondadores multifeixe (SMF) tem originado um aumento considerável no volume de dados de um levantamento hidrográfico (LH). Consequentemente, o recurso a algoritmos capazes de sistematizar e objetivar a estimação da profundidade, tornou-se indispensável.

O desenvolvimento do *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator* (CUBE) (Calder & Wells, 2007) teve como objetivo melhorar a eficiência e a objetividade do processamento de dados hidrográficos. As vantagens a nível de rapidez, face ao processamento tradicional, centram-se na limpeza de sondas (*data cleaning*) e no controlo de qualidade (*data QC*) (Fig. 1).



Fig. 1. Comparação entre o processamento tradicional e o processamento com CUBE (UNH, 2018).

O uso do CUBE encontra-se implementado no Instituto Hidrográfico (IH) desde 2011. No entanto, no procedimento atual, a limpeza de sondas ainda representa uma percentagem bastante superior aos anunciados 6%. Neste sentido, considera-se que a exploração das potencialidades do CUBE pode aperfeiçoar o procedimento em vigor.

Atualmente, o processamento de dados representa cerca de 65% do tempo total consumido num LH, em oposição aos 35% referentes à respetiva aquisição. A diminuição deste rácio constitui uma prioridade emergente, para a qual têm sido desenvolvidas

diversas técnicas (*CARIS Onboard*, *HIPS Batch Processor*).

Este trabalho tem como objetivo apresentar um procedimento alternativo que melhore a atual eficiência do processamento de dados batimétricos, otimizando a utilização do CUBE, sem comprometer as especificações do LH para o IH.

Através da exploração do funcionamento e operação do CUBE, foram desenvolvidas duas hipóteses alternativas ao procedimento atualmente instituído no IH. A respetiva validação baseou-se em dois casos de estudo de LH realizados nos rios Douro e Tejo.

## 2. PROCEDIMENTO

### 2.1. Algoritmo CUBE

O CUBE estima a profundidade em nodos predeterminados da superfície. Para além da profundidade, em cada nodo são calculados: a incerteza, o número de hipóteses (*hypothesis count*) e a confiança nas hipóteses (*hypothesis strength*), entre outras camadas de informação.

Um valor de *hypothesis count* superior a 1 evidencia que as sondas adquiridas geraram mais do que uma hipótese para a estimação da profundidade naquele nodo e o algoritmo teve que optar por uma delas, num processo designado por desambiguação.

A *hypothesis strength* traduz a confiança na hipótese selecionada pelo algoritmo (varia entre 0 e 5, correspondendo a 0 o maior nível de confiança), ou seja, a relação existente entre o número de sondas que alimentam a hipótese selecionada e o número de sondas existentes em todas as hipóteses da solução nodal.

A análise destas duas camadas reflete, por si, a robustez do desempenho do algoritmo. Neste sentido,

foram comparados dois procedimentos para o processamento de dados hidrográficos: procedimento normalizado e procedimento proposto.

### 2.1. Procedimento normalizado

O procedimento normalizado constitui a prática atualmente estabelecida no IH, assente nos seguintes pressupostos:

- Toda a área de sondagem deve ser inspecionada, implicando a abertura e exame de todos os *subsets*;
- Toda a área de sondagem deve ser limpa de sondas anómalas, mesmo aquelas que originam hipóteses alternativas que não foram consideradas pelo CUBE na estimação da profundidade.

Na realidade, a execução da limpeza descrita no segundo pressuposto replica o trabalho já efetuado pelo algoritmo, aumentando desnecessariamente o tempo de processamento. Assim, foi proposto e testado um procedimento alternativo, composto por duas versões.

### 2.2. Procedimento proposto

Para a versão A do procedimento proposto, foram definidas as seguintes etapas:

- Inspeccionar toda a área de sondagem, abrindo e examinando todos os *subsets*;
- Limpar apenas as sondas anómalas, que originam hipóteses que, erradamente, estão a ser consideradas pelo CUBE na estimação da profundidade, ou seja, onde a desambiguação não funcionou convenientemente (Fig. 2).

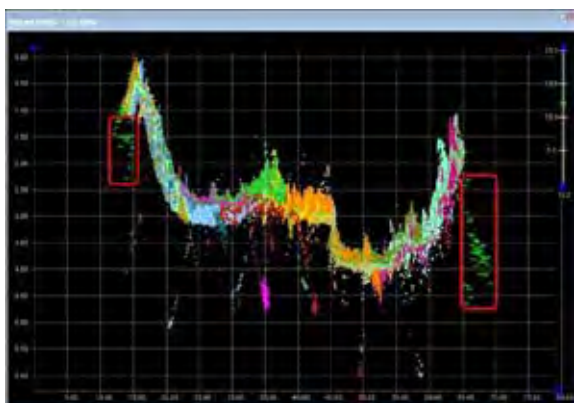


Fig. 2. Exemplo de um subset do LH no rio Douro, onde apenas foram limpas as sondas anómalas (polígonos vermelhos) que originavam hipóteses consideradas pelo CUBE erradamente.

Esta versão mantém a qualidade do procedimento normalizado, uma vez que mantém a inspeção de toda a área de sondagem por parte do hidrógrafo, prevenindo eventuais falhas do algoritmo. Por outro lado, representa uma poupança considerável de tempo, uma vez que dispensa a limpeza sistemática de sondas anómalas.

Por sua vez, para a versão B do procedimento proposto, foram definidas as seguintes fases:

- Inspeccionar as zonas da área de sondagem onde a *hypothesis count* é superior a 1 ou a *hypothesis strength* é superior a 0, abrindo e examinando os respetivos *subsets*;
- Limpar as sondas anómalas, que originam hipóteses que, erradamente, estão a ser consideradas pelo CUBE na estimação da profundidade.

A versão B diminui o rigor do procedimento normalizado, uma vez que não assegura a inspeção de toda a área de sondagem por parte do hidrógrafo, negligenciando eventuais falhas do algoritmo. Uma vez que este exame é direcionado para zonas específicas, esta versão, comparativamente com a versão A, apresenta uma poupança superior de tempo.

## 3. CASOS DE ESTUDO

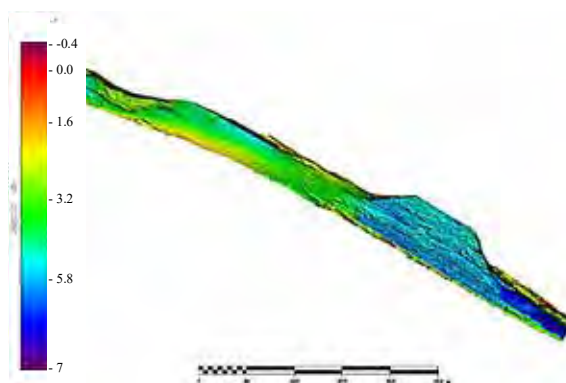
### 3.1. Caracterização

O estudo comparativo dos procedimentos propostos baseou-se em dois LH: um de ordem especial (OHI, 2008) no rio Douro, junto à foz do rio Tua (Fig. 3); e outro de ordem 1a (OHI, 2008) realizado no rio Tejo, junto ao cais do Parque das Nações (Fig. 4). A tabela I ilustra a percentagem de sobreposição entre faixas sondadas e a respetiva cobertura.

Tabela I. Especificações técnicas dos LH nos rios Douro e Tejo.

LH	Ordem	Sobreposição
Rio Douro	Especial	50%
Rio Tejo	1a	30%

As áreas sondadas apresentavam características morfológicas distintas: a do rio Douro era irregular, constituída por declives acentuados e fundo rochoso; e a do rio Tejo era maioritariamente plana e composta por sedimentos finos.



3. Modelo batimétrico do LH no rio Douro.

Os LH foram efetuados com a mesma plataforma e equipamentos de sondagem:

- Lancha hidrográfica: *Mergulhão*;
- SMF: *Kongsberg EM 2040C*;
- Posicionamento: *Real Time Kinematic (RTK)*;
- Software de aquisição: *SIS v.4.1.5*;
- Software de processamento *CARIS HIPS and SIPS v.10.4.2*.

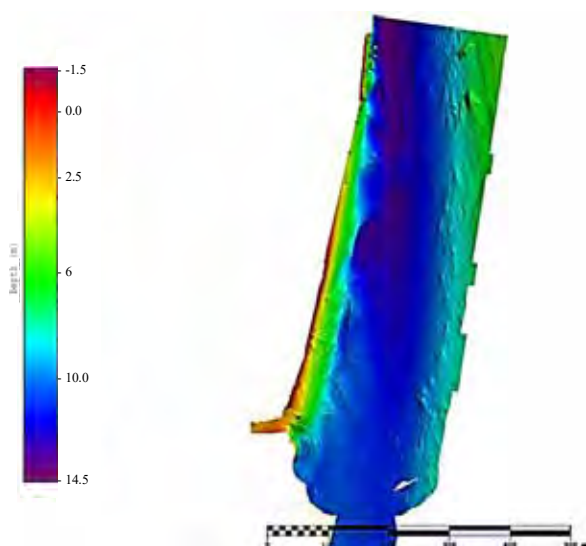


Fig. 4. Modelo batimétrico do LH no rio Tejo.

### 3.2. Processamento

No LH do rio Douro foi testada a versão A do procedimento proposto. Neste sentido, foi examinada toda a área de sondagem e editados apenas os dados que produziam erros na estimação da profundidade. A tabela II ilustra as diferenças obtidas no tempo de processamento.

Tabela II. Tempo despendido nos dois tipos de processamento no LH do rio Douro.

Aquisição	Procedimento Normalizado	Procedimento Versão A
02:38	05:27	01:20
33%	67%	-
66%	-	34%

A versão B do procedimento proposto foi testada no LH do rio Tejo. Neste âmbito, foram inspeccionadas e editadas apenas as zonas onde as camadas estatísticas do CUBE, nomeadamente a *hypothesis strength*, evidenciavam a necessidade de análise por parte do hidrógrafo (Fig. 5).

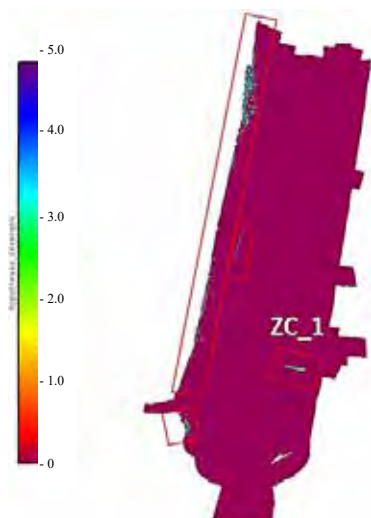


Fig. 5. Camada hypothesis strength, com identificação das zonas críticas para o processamento (polígonos vermelhos).

A tabela III ilustra as diferenças obtidas no tempo de processamento.

Tabela III. Tempo despendido nos dois tipos de processamento no LH do rio Tejo.

Aquisição	Procedimento Normalizado	Procedimento Versão B
01:39	04:33	00:55
27%	73%	-
64%	-	36%

### 3.3. Resultados

A avaliação dos resultados baseou-se na comparação, para cada procedimento, dos valores das sondas reduzidas das fiadas de verificação de sondagem (FVS) com as profundidades estimadas pelo modelo batimétrico gerado pelo CUBE a partir das sondas reduzidas das fiadas principais de sondagem (FPS). As tabelas IV e V ilustram a referida comparação.

Tabela IV. Comparação entre avaliações de integridade no LH do rio Douro.

Aquisição	Procedimento Normalizado	Procedimento Versão A
N.º de comparações	3 453 670	3 468 088
Cumprimento da oe	97,420%	97,074%

Tabela V. Comparação entre avaliações de integridade no LH do rio Tejo.

Aquisição	Procedimento Normalizado	Procedimento Versão B
N.º de comparações	1 707 841	1 732 714
Cumprimento da o1a	99,987%	99,982%

Os resultados obtidos são consistentes com o esperado, ou seja, se são eliminados menos sondas anómalas, é expectável que, a este nível, o número de comparações aumente e que a percentagem de cumprimento da ordem do LH diminua. Esta diminuição é pouco significativa face ao tempo de processamento economizado e não compromete as respetivas especificações, uma vez que se mantém bastante superior a 95%. No entanto, podem existir LH onde a falta de limpeza de sondas anómalas comprometa esta metodologia de avaliação de integridade.

Foi ainda realizada uma comparação entre os modelos batimétricos gerados após a execução de cada um dos procedimentos. A tabela VI sistematiza os resultados.

Tabela VI. Resultados da comparação entre modelos batimétricos.

Aquisição	Normalizado VS Versão A	Normalizado VS Versão B
Média das diferenças	0,032 m	0,000 m
Desvio padrão	0,063 m	0,024 m
Diferença mínima	-3,869 m	-4,467 m
Diferença máxima	3,953 m	7,983 m

A análise destes resultados permite concluir que, nestes casos de estudo, as diferenças entre os procedimentos estão mais relacionadas com as



características da superfície sondada do que com o procedimento seguido.

A versão B do procedimento proposto, mais expedita e menos rigorosa, gerou diferenças menores do que a versão A, devido à natureza irregular da área de sondagem no rio Douro. As diferenças nesta área correspondem a zonas de declive acentuado e advêm, não da disparidade entre procedimentos, mas do facto de uma pequena alteração nas sondas eliminadas, facilmente se traduzir numa desigualdade na estimação da profundidade. Ou seja, poder-se-iam originar diferenças da mesma ordem, caso dois hidrógrafos diferentes processassem a área de acordo com o mesmo procedimento normalizado.

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho procurou apresentar um procedimento alternativo que melhorasse a eficiência do processamento de dados batimétricos, sem comprometer o cumprimento dos requisitos mínimos da publicação S-44 (OHI, 2008) e salvaguardando a segurança da navegação.

Este estudo demonstrou ser possível, através da simples exploração do CUBE, materializar uma das prioridades emergentes dos LH, invertendo o atual rácio entre tempos de aquisição e processamento de 35/65% para 65/35%.

A análise dos procedimentos propostos permite concluir, relativamente à versão A, que esta mantém uma qualidade idêntica à do procedimento normalizado, não comprometendo as especificações do LH, conforme estão definidas no IH. A aplicação deste procedimento otimiza a utilização do CUBE, potenciando os seus automatismos. No entanto, dificulta o controlo de qualidade por terceiros, uma vez que exige que estes confirmem que nos nodos onde existe mais do que uma hipótese, a desambiguação do algoritmo foi a correta, tal como verificado pelo hidrógrafo. Assumindo que o produto final do LH é o modelo batimétrico e não as sondas, este procedimento pode ser implementado sem reservas, à exceção da necessidade de desenvolver novas técnicas para a execução da avaliação de conformidade.

No que respeita à versão B, ela apenas faz sentido em áreas de fundo regular. Em áreas de fundo irregular, as camadas *hypothesis count* e *hypothesis strength* vão apresentar valores superiores a 1 e a 0, respetivamente, não só devido à existência de sondas anómalas, mas sobretudo devido ao declive acentuado. Consequentemente, neste tipo de fundos, estas camadas não resultam como indicadores de necessidade de limpeza por parte do hidrógrafo. Adicionalmente, este procedimento deve aplicar-se apenas onde a profundidade não seja de importância crítica para a navegação típica na área, por norma, para fundos superiores a 40 m. Uma vez que esta versão do procedimento não obriga à inspeção da totalidade da área de sondagem, confiando em

absoluto no CUBE, deve ser usada com prudência, privilegiando situações em que a celeridade do processamento se sobreponha à respetiva qualidade, nomeadamente em cenários de emprego da Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida (EHIR).

A utilização de qualquer um dos procedimentos propostos deve ter em consideração a densidade de sondas (sobreposição entre fiadas adjacentes superior a 30%) e a regularidade do fundo (declive pouco acentuado).

Como linha de investigação futura sugere-se o desenvolvimento de uma solução para a avaliação de conformidade que complemente este procedimento, bem como a exploração de outras camadas de informação do CUBE ou o seu cruzamento com outros modelos, que permitam sistematizar e objetivar o processamento por parte do hidrógrafo.

#### REFERÊNCIAS

- Calder, B. & Wells, D., 2007. CUBE User's Manual - Version 1.13. [Online] Disponível em: [http://ccom.unh.edu/sites/default/files/publications/Calder\\_07\\_CUBE\\_User\\_Manual.pdf](http://ccom.unh.edu/sites/default/files/publications/Calder_07_CUBE_User_Manual.pdf) [Acedido em 13 de maio de 2018].
- OHI (Organização Hidrográfica Internacional), 2008. Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos. [Online] Disponível em: [https://www.iho.int/iho\\_pubs/standard/S-44\\_Ed%205%200%200\\_PT-BR%20%282%29.pdf](https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-44_Ed%205%200%200_PT-BR%20%282%29.pdf) [Acedido em 13 de maio de 2018].
- UNH (University of New Hampshire), 2018. CUBE. [Online] Disponível em: <http://ccom.unh.edu/the-me/data-processing/cube> [Acedido em 13 de maio de 2018].

## Produtos *Satellite Derived Bathymetry* no apoio à Decisão às Operações de remoção do navio ‘Betanzos’

Pedro Vilar (1), Rui Guerreiro (1), Ana Moura (1), Cristina Monteiro (1) e Carlos Videira Marques (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal. E-mail: [pedro.vilar@hidrografico.pt](mailto:pedro.vilar@hidrografico.pt)

**Resumo:** A 6 de março de 2018 o navio “Betanzos” ficou à deriva no porto de Lisboa, vindo a encalhar na Golada do Bugio que é caracterizada pelas suas baixas profundidades e por constantes alterações morfodinâmicas. Sendo que o último levantamento hidrográfico na zona data de setembro de 2015, e de modo a poder apoiar a Autoridade Marítima nas operações de remoção do navio, o Instituto Hidrográfico produziu uma série temporal de modelos batimétricos derivados de satélite (SDB) obtidos a partir de imagens multiespectrais adquiridas pela missão Sentinel-2 no período de novembro de 2017 a janeiro de 2018. Estes modelos, formando uma série temporal, tiveram como objetivo derivar informação batimétrica de forma a estudar as alterações e a dinâmica e efetuar uma previsão das estruturas do fundo à data das operações de remoção do navio. Tratando-se de um método de Detecção Remota e tendo em conta a rápida e recorrente disponibilização das imagens (período de revisita de 5 dias) e a eficiência do seu processamento, foi possível pela primeira vez, elaborar um produto SDB, em tempo útil, para apoio à decisão e à atividade operacional da Autoridade Marítima.

**Palavras-chave:** *Satellite Derived Bathymetry*, Modelos Batimétricos, Autoridade Marítima, ‘Betanzos’, Apoio à Decisão.

### 1. INTRODUÇÃO

Em Portugal Continental, os meses de fevereiro e março de 2018 foram caracterizados por diversos avisos de mau tempo e forte agitação marítima emitidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). A 6 de março de 2018, coincidente com períodos de alerta de temporal e em condições adversas (vento do quadrante oeste de 20 nós, agitação marítima de 4 m também de oeste), o navio “Betanzos” de bandeira espanhola ficou à deriva à saída da barra do porto de Lisboa, vindo a encalhar nos bancos de areia aí existentes entre o Bugio e a Golada do rio Tejo.



Fig. 1. Excerto da carta náutica 26304 com a identificação da Golada do Bugio.

O Instituto Hidrográfico (IH), no exercício das suas competências, fez o acompanhamento da situação, prestando o apoio técnico necessário à tomada de

decisão por parte do Capitão do Porto de Lisboa, Autoridade Marítima Nacional (AMN). O acompanhamento desta situação consistiu, essencialmente, na análise da evolução das condições meteo-oceanográficas e no apoio dado pela primeira vez com produtos operacionais baseados em informação batimétrica derivada (SDB – *Satellite Derived Bathymetry*) a partir de imagens multiespectrais da missão Sentinel-2. A metodologia aplicada neste trabalho tem sido desenvolvida ao longo dos últimos anos por Guerreiro e Moura (2015; 2016), tendo sido recentemente adaptada e automatizada no âmbito do projeto *Coastal Waters Research Synergy Framework* (Co-ReSyF) por Vilar *et al.* (2018a;2018b). Com este trabalho pretende-se divulgar a criação do primeiro produto de apoio operacional elaborado com base em técnicas de SDB, com o objetivo específico de dar apoio à decisão nas operações de remoção do navio encalhado.

### 2. CONTEXTUALIZAÇÃO SDB NO IH

A possibilidade de derivar informação batimétrica atualizada a partir de imagens de satélite multiespectrais para áreas pouco profundas, normalmente de acesso condicionado para os sistemas tradicionais, é uma temática atualmente em voga na comunidade hidrográfica. Esta metodologia encontra-se em franco desenvolvimento no IH, tendo como motivação inicial a promoção da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) para a utilização de técnicas de derivação batimétrica alternativas, vindo-se a desenvolver com a participação em projetos I&D. Esta capacidade ganhou especial

interesse com o Programa Copernicus, pela disponibilização gratuita de imagens com melhor resolução espacial (incremento de 30 m de resolução espacial das imagens Landsat-8, para 10 m de resolução espacial das imagens Sentinel-2) e, mais recentemente, com a diminuição do período de revisita para 5 dias, com o lançamento do satélite Sentinel-2B, que atua em modo conjunto com o satélite Sentinel-2A.

Desde finais de 2013 têm sido desenvolvidos no IH estudos neste âmbito e publicados os primeiros resultados da metodologia de derivação SDB a partir de imagens multiespectrais de alta resolução (Guerreiro e Moura, 2015;2016) e mostradas as suas potencialidades no apoio à produção cartográfica (Moura *et al.*, 2016). Mais recentemente, a participação do IH no projeto Co-ReSyF permitiu a automatização da metodologia SDB e o desenvolvimento de estudos no âmbito da validação dos produtos batimétricos (Vilar *et al.*, 2018a:2018b), dotando-a de um carácter mais operacional, resultando na diminuição significativa do tempo de processamento e no aumento da capacidade de resposta em questões de apoio à decisão.

A metodologia SDB utilizada na realização deste trabalho foi desenvolvida por Vilar *et al.* (2018a; 2018b) sendo uma adaptação da solução apresentada por Guerreiro e Moura (2015). O algoritmo de derivação integrado na metodologia, é um algoritmo empírico, apresentado por Stumpf *et al.* (2003), para o qual é necessário a utilização de alguns valores de profundidade *in situ* para a calibração a partir da qual se obtém um modelo batimétrico SDB final.

### 3. PRODUTOS SDB NO APOIO À DECISÃO NAS OPERAÇÕES DE REMOÇÃO DO NAVIO “BETANZOS”

O IH na atuação das suas competências prestou apoio nas operações de remoção do navio, fornecendo informação meteo-ocenográfica atualizada e informação batimétrica referente ao último levantamento hidrográfico (LH) realizado na área, em setembro de 2015, a feixe simples, que cumpre a Ordem 2 de acordo com a classificação da S-44 (International Hydrographic Organization, 2008). A par desta informação foram também elaborados e cedidos os primeiros produtos cartográficos SDB, de carácter operacional.

Uma vez que o último LH da área do acidente data de setembro de 2015, devido às condições meteo-oceanográficas verificadas na época do acidente não foi possível a aquisição de informação batimétrica atualizada por métodos tradicionais, e porque na área em questão já se comprovou a aplicabilidade dos métodos SDB (Guerreiro e Moura, 2015), a derivação de batimetria SDB mostrou-se ser a via mais adequada, rápida e *cost-efficient* para a obtenção de informação atualizada do fundo. Os

produtos elaborados com base nesta informação, e entregues à AMN, constituíram assim mais uma ferramenta disponível no apoio à decisão. Não obstante do mencionado, as técnicas SDB que têm por base a utilização de imagens de satélite multiespectrais estão condicionadas por um conjunto de características, referidas frequentemente como condições ideais de aquisição das imagens, nomeadamente, ausência de nuvens, águas límpidas (com baixa concentração de matéria em suspensão) e sem agitação marítima. Tais condições foram difíceis de observar à data do encalhe do navio, que coincidiu com um período de mau tempo e forte agitação marítima. Apenas duas imagens relativamente próximas do evento puderam ser consideradas: uma de 19 de novembro de 2017 adquirida pelo sensor Sentinel-2B e outra de 30 de janeiro de 2018 adquirida pelo satélite Sentinel-2A.

#### 3.1. Características dos produtos SDB entregues à AMN

A partir das imagens de satélite multiespectrais referidas anteriormente foram criados e entregues à AMN dois produtos operacionais (Fig.2).

Estes produtos pretenderam facultar a informação da morfologia do fundo, o mais atualizada possível, enquadrada com a posição do navio “Betanzos”, de modo a facilitar a tomada de decisão na remoção do navio.

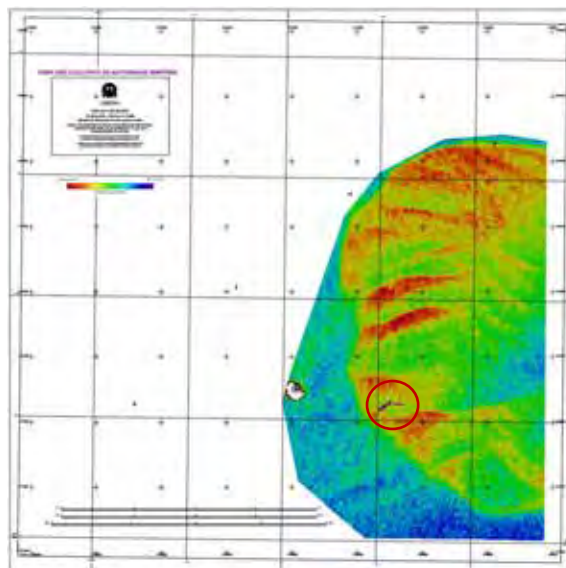


Fig. 2. Produto operacional SDB, derivado com base na imagem Sentinel-2A de 30 de janeiro de 2018, com a posição e orientação aproximadas do navio “Betanzos”, retirada da imagem Sentinel-2A de 11 de março (círculo de cor encarnada).

A decisão na definição das características de construção e impressão dos produtos SDB recaiu essencialmente na intenção de facilitar a interpretação de nova informação em combinação com os dados batimétricos já existentes (LH de 2015). Para tal foi necessário ter em atenção algumas questões:

- Correta identificação da informação e metodologia que deu origem ao produto SDB;
- Facilitar a interpretação qualitativa da morfologia do fundo, em vez da interpretação quantitativa;
- Características cartográficas (Sistema geocartográfico – PTTM06/ETRS89, escala – 1:5 000 e limites geográficos) iguais às da implantação gráfica do último LH realizado em 2015;
- Representação da quadrícula geográfica, quadrícula retangular e escalas gráficas em metros, milhas e jardas;

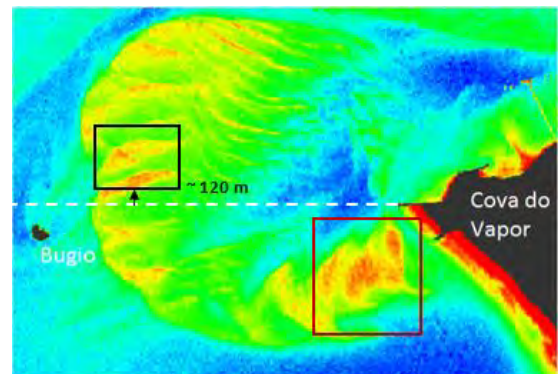
permitindo assim, desenvolver um conjunto de metainformação no título do produto (Fig.3).



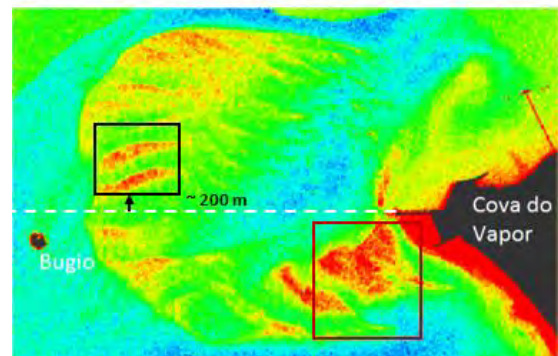
Fig. 3. Título do produto operacional SDB entregue à AMN.

Relativamente à interpretação e análise dos produtos, houve a necessidade de garantir que era efetuada uma interpretação qualitativa das estruturas de fundo, em vez de uma avaliação quantitativa. Isto deve-se ao facto de que as imagens de satélite multiespectrais raramente beneficiam das condições de aquisição ideais referidas anteriormente. Se adicionarmos ainda os efeitos dispersivos da atmosfera, tem-se que as metodologias SDB determinam o valor da profundidade com uma incerteza elevada comparativamente com as profundidades determinadas através de sondadores acústicos. Por esta razão, e devido à resolução espacial de 10 m das imagens Sentinel-2 utilizadas, nestes produtos optou-se por uma escala de cores (Fig.3) associada a “mais fundo” e “menos fundo” em vez de um intervalo específico com valores de profundidade. Não sendo possível a utilização de uma imagem de satélite à data do evento, foram utilizadas duas imagens, uma adquirida a 19 de novembro de 2017 e outra a 30 de janeiro de 2018 permitindo a avaliação das alterações num espaço temporal de 2 meses. Mais recentemente, e

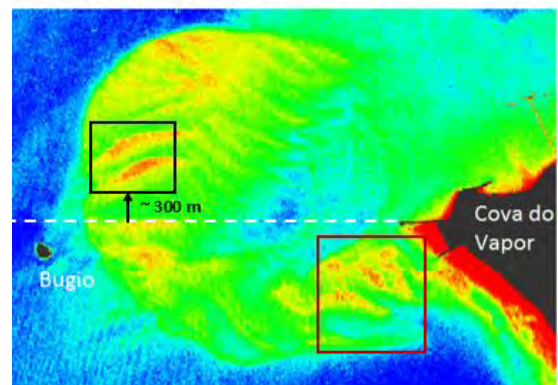
posteriormente à remoção do navio, foi derivado mais um modelo batimétrico SDB (imagem de 25 de abril do Sentinel-2, de modo a perceber se a tendência evolutiva dada pelas duas imagens anteriores se mantinha, e analisar o quanto os eventos meteorológicos do temporal tinham alterado a estrutura morfológica do Bugio.



Modelo SDB Imagem S2-B de 19 de novembro de 2017



Modelo SDB Imagem S2-A de 30 de janeiro de 2018



Modelo SDB Imagem S2-B de 25 de abril de 2018

Fig. 4. Série temporal criada a partir de modelos SDB derivados de 3 imagens Sentinel-2, que confirma a tendência morfodinâmica apresentada à data de entrega dos produtos SDB à AMN, continuando a verificar-se uma deslocação das principais estruturas de fundo de sul para norte de cerca de 300 m em 5 meses.

### 3.2. Análise dos resultados

Através da análise dos produtos SDB foi possível detetar a tendência das alterações da morfologia de fundo e qual a orientação predominante das dunas que, enquadrado com a posição do navio, permitiu aos decisores um melhor planeamento na remoção

do mesmo, de forma a que a sua retirada do local fosse possível. Conforme evidenciado na Fig.4, existe uma deslocação das dunas identificadas pela região a preto na Fig. 4, de sul para norte, com o deslocamento de 300 m em relação à direção do cais de Cova do Vapor (a tracejado na Fig. 4), num intervalo temporal cinco meses (entre 19 de novembro de 2017 e abril de 2018). Adicionalmente, verifica-se que, de 19 de novembro de 2017 para 30 de janeiro de 2018, existe uma diminuição da profundidade (ver as alterações dos tons de vermelho ao longo das imagens da Fig.4) na região da Golada e no baixio que se encontra a sudoeste do cais da Cova do Vapor (zona delimitada por retângulo a vermelho na Fig. 4). O modelo gerado com a imagem adquirida em abril de 2018 permitiu observar a mesma tendência no deslocamento das dunas de sul para norte, tal como um considerável aumento da profundidade na região da golada.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente artigo mostrou-se o potencial e a capacidade que modelos batimétricos SDB têm no apoio à tomada de decisão, numa perspetiva operacional, no caso concreto do encalhe do navio “Betanzos” na Golada do Bugio. Os vários estudos já desenvolvidos neste instituto, a automatização da metodologia de derivação, e a disponibilização gratuita de imagens assente num curto período de revisita, faz desta metodologia e produtos resultantes, instrumentos importantes de trabalho em situações de emergência, rápidos e eficientes, a custos muito reduzidos (apenas tempo de gabinete de técnicos especializados), quando comparados com a logística, aquisição, risco e processamento de dados adquiridos com sondadores acústicos. Ressalva-se, no entanto, que para metodologias SDB o grau de confiança na determinação da profundidade é ainda muito baixo quando comparados com as incertezas verticais requeridas na especificação da S-44 (International Hydrographic Organization, 2008). No entanto, a possibilidade de utilizar uma série temporal de imagens, desde que estas satisfaçam as condições necessárias, permite, sem riscos e praticamente sem custos, analisar a evolução das estruturas do fundo, para baixas profundidades, em situações de emergência. Espera-se que estes tenham sido apenas os primeiros produtos operacionais deste tipo para apoio à decisão, e que com o crescente conhecimento da aplicação destas metodologias noutras áreas geográficas, venham a ser desenvolvidos outros produtos no apoio à Marinha e Autoridade Marítima Nacional.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Espacial Europeia (ESA) a disponibilização de imagens Sentinel-2 no âmbito do programa *Copernicus*.

#### REFERÊNCIAS

- Guerreiro, R. e Moura A. (2015) Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Lisboa.
- Guerreiro, R. e Moura, A. (2016). A utilização de imagens de satélite multiespectrais de elevada resolução espacial para a derivação de batimetria. *Actas das 4.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 41-44.
- International Hydrographic Organization. (2008). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (5th ed.). Monaco.
- Moura, A., Guerreiro, R., e Monteiro, C. (2016). As Potencialidades da Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite Multiespectrais na produção de Cartografia Náutica. *Actas das 4.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 52-55.
- Stumpf, R.P., Holdereid, M. e Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol. 48, No. 1, Part 2, 547-55.
- Vilar, P., Moura, A., Guerreiro, R., Lamas, L., e Pinto, J. (2018a). A multispectral earth observation approach for retrieving bathymetric data: models and in situ data evaluation. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 20, EGU2018-452-2, EGU General Assembly.
- Vilar, P., Moura, A. e Lamas, L. (2018b). Operacionalização de Metodologias para a Extração de Batimetria a partir de dados de Detecção Remota. *Actas das 5.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa (em Publicação).

# Construção de Implantações Gráficas em AutoCAD Civil Metric 3D

**Cristina Monteiro (1), Teixeira de Carvalho (1), Gerales Dias (1), C. Videira Marques (1)**

(1) Inst. Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. E-mail: [cristina.monteiro@hidrografico.pt](mailto:cristina.monteiro@hidrografico.pt)

**Resumo:** As Implantações Gráficas (IG) são o produto de cartografia hidrográfica, no qual se representa a informação topo-hidrográfica adquirida num levantamento, a uma escala adequada respeitando critérios de seleção, simbologia, organização e apresentação. Envolve diversas fontes de informação que proveem de diferentes aplicações informáticas, sujeitas a diferentes processos de tratamento, importação, transformação e organização de dados.

Este produto era construído, até então, no *software* Caris GIS, que se encontra descontinuado, sendo posteriormente exportado para os formatos requeridos pelo cliente, normalmente associados aos *softwares* comerciais mais comuns AutoCAD e ArcGis. A necessidade de encontrar alternativas à produção tradicional, obrigou à exploração destes *softwares*, para a construção direta das IG.

Este trabalho pretende analisar uma nova metodologia na construção da IG, com recurso ao AutoCAD Civil Metric 3D, e perceber a sua capacidade de resposta em tempo e eficiência aos critérios de análise e representação de cartografia hidrográfica implementados.

**Palavras-chave:** Cartografia Hidrográfica, Implantações Gráficas, *AutoCAD*, Multifeixes.

## 1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH), segundo as competências que lhe são conferidas no Decreto-lei n.º 141/2014 de 19 de setembro, é responsável pela definição e publicação de especificações técnicas para a cartografia hidrográfica, normalizando a organização e a representação gráfica dos diversos objectos que definem a morfologia e a natureza do fundo das zonas imersas e da região emersa adjacente. O objeto primordial da cartografia hidrográfica é a representação gráfica de dados batimétricos e compreende todos os produtos finais bidimensionais ou tridimensionais, em formato analógico ou digital que contenham este tipo de informação, excepto as cartas náuticas (CN) e as cartas eletrónicas de navegação, segundo as Especificações Técnicas – Produção de Cartografia Hidrográfica (IH, 2009). Os produtos finais podem ser Implantações Gráficas (IG) em formato analógico ou digital (vulgarmente designadas por pranchetas), Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Modelos Digitais do Terreno, denominados no contexto da cartografia hidrográfica por Modelos Batimétricos, entre outros (IH, 2009).

Os levantamentos topo-hidrográficos executados pelo próprio Instituto Hidrográfico respeitam estas especificações e são acompanhados de um relatório técnico final, que inclui as respetivas implantações gráficas (IG) à escala adequada. Até então, as IG eram construídas no *software* Caris GIS, sujeitas a uma composição no Caris Plot Composer para efeitos de impressão e finalmente convertidas para AutoCAD 2D.

A necessidade de encontrar uma alternativa na construção deste produto tem como principal causa a descontinuidade do *software* Caris GIS e também a necessidade de simplificar o processo de construção.

Este artigo pretende descrever a construção de uma IG em AutoCAD Civil 3D, realizar a comparação entre os dois métodos (comparando com o método até agora utilizado) e avaliar a sua conformidade face às especificações publicadas pelo IH.

## 2. METODOLOGIA

Foram criadas duas IG, uma recorrendo ao Caris GIS e outra com recurso ao AutoCAD Civil 3D do levantamento topo-hidrográfico (LTH) de outubro de 2017 no rio Tejo, junto ao cais da EXPO, classificado com Ordem 1a segundo os padrões da S-44 (OHI, 2008).

### 2.1 Construção da IG no modo tradicional

A construção das IG através do método tradicional obedece à seguinte sequência: a IG é produzida, em formato vectorial (sobre um ficheiro previamente criado no sistema geo-cartográfico em vigor, com dimensões e escala adequadas) no *Software* CARIS GIS a partir dos dados hidrográficos validados (ficheiro da supressão de sondas mínimas proveniente do Caris HIPS and SIPS) e dos dados topográficos; estes dados são organizados por camadas de informação (tipo ponto, linha e polígonos com características gráficas específicas) e a partir deles é construído uma TIN (Triangular Irregular Network) e criadas automaticamente as respetivas isobatimétricas, é ainda neste *software* que se adiciona a respetiva quadrícula; o ficheiro em formato Caris GIS devidamente georreferenciado é aberto no Caris Plot Composer que reconhece as suas dimensões (à escala) e o grafismo de todos os objetos representados, sendo complementado com o Título e o Esquema (criados em PowerPoint), para impressão da IG em PDF e formato analógico; finalmente, para distribuição externa (quando aplicável), o ficheiro vectorial da IG no formato do

Caris GIS é convertido, através de uma rotina em Visual Basic, para o formato DXF, (sujeito ainda a uma nova edição gráfica e organizacional no software AutoCAD 2D e inclusão do respetivo Título e Esquema).

## 2.2 Construção da IG em AutoCAD Civil 3D

A IG produzida em AutoCAD Civil 3D, foi totalmente criada neste *software* (desde a sua conceção até à impressão), partindo da importação dos mesmos ficheiros de origem do LTH: ficheiro de dados hidrográficos validados em formato ASCII (com a supressão de sondas mínimas espaçadas 4mm entre si à escala da implantação) proveniente do Caris HIPS e do ficheiro de dados topográficos (ficheiro de topografia em formato LandXML exportado pelo Trimble Business Center).

### 2.2.1. AutoCAD Civil 3D – configuração

Inicialmente foi necessário configurar o projeto no AutoCAD Civil 3D com algumas especificidades do desenho, das quais se realça o sistema de geocartográfico PT-TM06-ETRS89 (adequado para a localização do LTH) e respetiva escala (1:1 000).

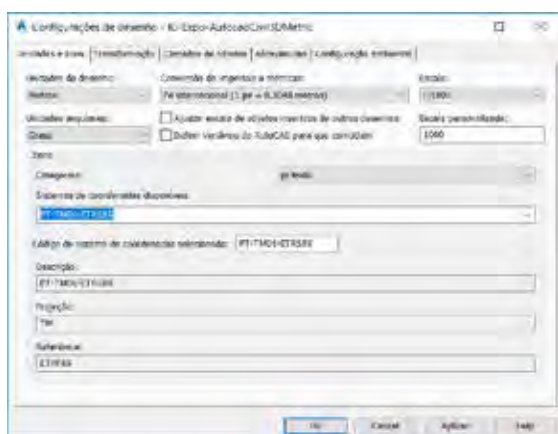


Fig. 1. Configuração inicial do projeto. Projeção e escala.

A importação dos ficheiros de origem é intuitiva através da barra de ferramentas do *software* que apresenta uma grande variedade de formatos.

### 2.2.2. AutoCAD Civil 3D – representação gráfica 2D do valor de profundidade (x,y,z)

Segundo as especificações em vigor (IH,2009) a representação 2D do valor de z (profundidade), pode ser feita de dois modos: definindo uma única camada 'sonda' cujo texto com o valor de z faz coincidir ao ponto decimal do número a posição da sonda (à semelhança da CN); ou em alternativa, definindo duas camadas distintas: 'Sonda\_posição' para representar a posição da sonda e a segunda 'Sonda\_valor' para representar o texto com o valor de z.

Foram exploradas no AutoCAD Civil 3D as duas possibilidades. Para a primeira foi necessário criar um estilo de legenda que obriga à divisão do atributo 'elevação' em 3 blocos: parte decimal direita,

decimal esquerda e ponto decimal. Desta forma garante-se que independentemente do tamanho do número, o ponto decimal está sempre centrado na posição da sonda (fig. 2).



Fig. 2. O ponto decimal do valor numérico coincide com a posição da sonda (representado na figura com por uma cruz)

Para a segunda, manteve-se o grafismo do conversor Caris GIS – AutoCAD 2D, criando um bloco 'DOT' nas coordenadas (x,y,z) para representar a sonda geograficamente na IG e o texto com o respetivo valor de z numa posição próxima.



Fig. 3. O DOT (bloco azul escuro) coincide com a posição da sonda (representado na figura com por uma cruz); o valor numérico da sonda é um bloco de texto único representado ligeiramente à direita da sonda.

### 2.2.3. AutoCAD Civil 3D – construção da batimetria

O processo de construção das isobatimétricas no AutoCAD CIVIL 3D é semelhante ao do Caris GIS, baseando-se sobre a TIN construída a partir dos pontos hidrográficos, sendo aconselhável criar uma linha de fronteira (para otimizar o processo nos limites da área). Este *software* permite visualizar e editar a TIN com muita facilidade, porque a converte numa superfície, apresentando o polígono que a delimita e/ou a rede de triângulos e disponibilizando um conjunto de ferramentas e parâmetros de edição e visualização: permitindo criar isobatimétricas, visualizar a profundidade em toda a superfície à passagem do cursor, visualizar a superfície em 3D com exageração vertical, etc.

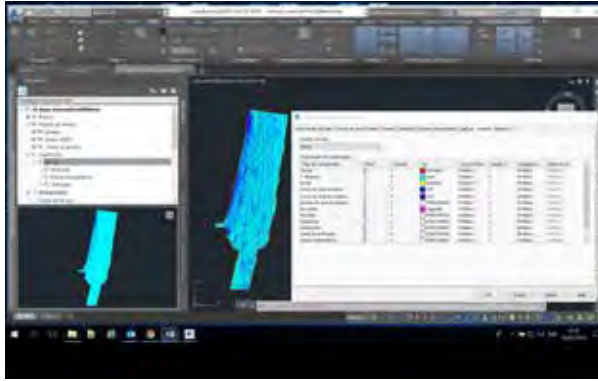


Fig. 4. Ambiente AutoCAD Civil 3D – construção da isobatimetria.

Posteriormente editaram-se os blocos de texto das sondas, de forma a criar um resguardo aos mesmos, para otimizar a visualização dos dados nos locais de intersecção, mascarando o traçado das isobatimétricas sobre as sondas.

#### 2.2.4. AutoCAD Civil 3D – Ajudas à Navegação

Os Pontos Notáveis e as Ajudas à Navegação, que se pretendam representar na IG, devem estar de acordo com as especificações (IH, 2009), respeitando a organização e a simbologia pré-definida.

Neste caso em particular, foi necessário representar apenas uma boia. Para tal foi introduzido o ficheiro de blocos da LIVRARIA\_SIMBOLOS\_V00.dwg disponível na página do IH, e colocada a boia com a simbologia adequada na posição de projeto.



Fig. 5. Implantação de uma boia na IG (simbologia adaptada do INT1)

#### 2.2.5. AutoCAD Civil 3D - Layout

Para preparar a folha para impressão é necessário configurar a sua dimensão, o AutoCAD permite configurar e personalizar a dimensão da folha, que deve ter mais 100 mm que a *Viewport*. Ainda na configuração da folha parametriza-se a impressora associada ao próprio programa 'AutoCAD PDF (High Quality Print).pc3', que permite exportar para PDF a informação da IG em camadas.

Coloca-se a quadrícula com a resolução e escala adequada. E por fim o bloco com o Título e Esquema do IH, tudo construído no próprio AutoCAD Civil 3D.

### 3. COMPARAÇÃO GRÁFICA

As figuras 6 e 7 apresentam as imagens (possíveis), das IG construídas no AutoCAD e no Caris GIS, respetivamente. As diferenças gráficas são quase nulas, a menos da quadrícula e da paleta de cor diferenciada que foi propositadamente aplicada para efeitos de comparação no Caris HIPS and SIPS.

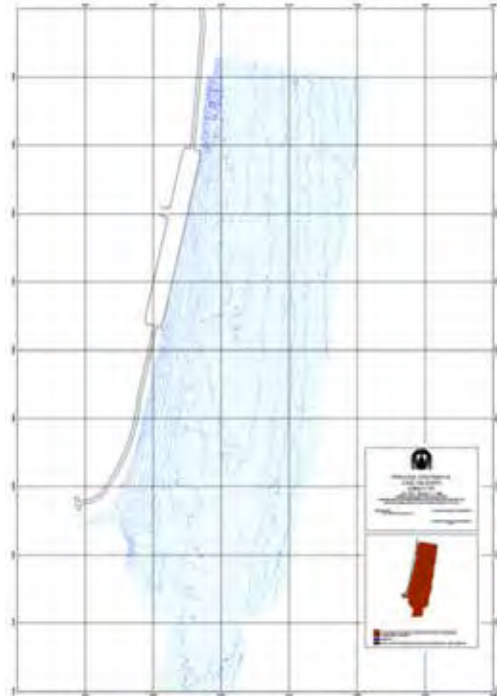


Fig. 6. Imagem da IG construída no AutoCAD Civil 3D

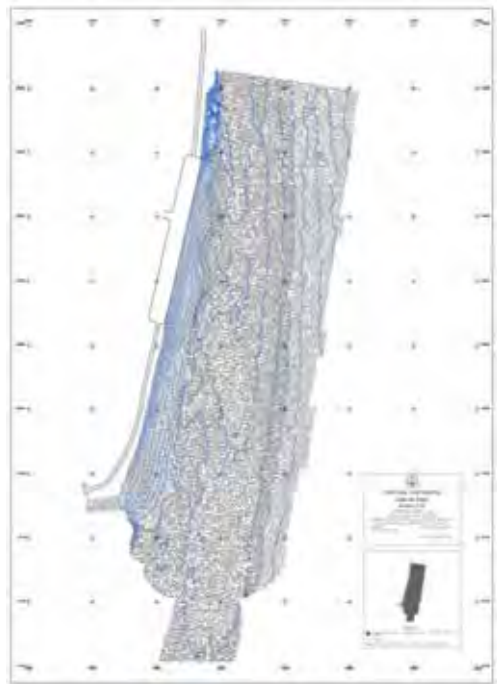


Fig. 7. Imagem da IG construída no Caris GIS e impressa no Caris Plot Composer (no limite inferior da IG, é necessária uma edição manual para eliminar as sondas que excedem a quadrícula, na fig. 6 percebemos que o próprio software faz isso automaticamente).



Para verificar se os pontos estão bem localizados e analisar o traçado das isobatimétricas exportou-se o projeto em AutoCAD Civil 3D para dxf 2007, de forma a poder ser aberto no Caris HIPS and SIPS juntamente com o projeto exportado do Caris GIS e convertido em dxf pela rotina em Visual Basic. Desta análise verificou-se a consistência posicional entre as duas IG. Em relação ao desenho das isobatimétricas, verificou-se, que para estes dados, cuja densidade de dados provém de sistema sondador multifeixe, os dois *softwares* produzem linhas isobatimétricas praticamente sobrepostas (Fig.8). Será ainda necessário avaliar melhor o comportamento do algoritmo, para dados de feixe simples, ou outros sistemas de aquisição com menor densidade de dados.



Fig. 8. Diferenças entre isobatimétricas criadas pelo Caris GIS (linha preta) e AutoCAD (linha azul). Os dois softwares, constroem a isobatimetria a partir da TIN.

#### 4. TRANSIÇÃO DE PROCEDIMENTOS

Para implementar a construção de IG em AutoCAD Civil 3D, ainda será necessário elaborar o respetivo procedimento de trabalho. Tendo em conta o *know-how* adquirido na edição das anteriores IG em AutoCAD 2D e as formações recentes em AutoCAD 2D e Civil 3D realizadas por elementos da Divisão de Hidrografia e Brigada Hidrográfica, a transição entre procedimentos será efetuada com relativa facilidade.

Os processos mais difíceis estão relacionados com a configuração do próprio ficheiro, das camadas de informação, dos estilos dos pontos e legendas (Título e Esquema), mas uma vez configurados, a sua utilização pode ser partilhada, simplificando o processo de construção da IG e garantindo em termos gráficos a padronização definida.

As IG em AutoCAD Civil 3D são consideravelmente mais rápidas de realizar. No entanto, para se poder trabalhar neste *software* aconselha-se a tirar a visualização da legenda da elevação (blocos), durante a edição. Estes objetos provocam uma lentidão em todo o processo tanto na edição do modelo como na preparação do *Layout*. Em caso da necessidade de efetuar pequenas correções à IG, à *posteriori*, o que ocorre com alguma frequência, após as ações de avaliação de conformidade que os LTH são sujeitos no IH, basta alterar os objetos a serem editados e a *Layout* fica instantaneamente atualizada. Isto representa uma

enorme vantagem em comparação com o método anterior (que obrigava a refazer a IG desde o Caris GIS até à reedição do ficheiro DXF no AutoCAD).

O ficheiro vetorial final da IG, mediante a solicitação do cliente, pode ser convertido num ficheiro de AutoCAD 2D (mantendo todos os aspectos gráficos a 2D) e/ou pode ser entregue na versão do AutoCAD Civil 3D, e neste caso inclui a informação a superfície TIN, podendo ser usado diretamente para efetuar análise tridimensional, cálculo de declives, efetuar projetos de engenharia, cálculo de volumes a dragar, entre outros.

A impressão em PDF realizada pelo AutoCAD Civil 3D permite selecionar as várias camadas do projeto. Assim o cliente pode analisar e visualizar os objetos de forma diferenciada, e se pretender realizar impressões personalizadas, sem a necessidade de editar a IG nem abrir o *software* AutoCAD.

#### 5. CONCLUSÕES

A principal motivação para a transição de procedimentos foi a descontinuidade do *software* Caris GIS. O AutoCAD Civil 3D mostrou ser um *software* com capacidades adequadas para dar resposta à construção das IG em conformidade com as especificações técnicas em vigor.

Existe uma simplificação e rentabilidade em tempo considerável com este novo procedimento. A edição dos dados de hidrografia e de topografia passa a ser realizada num único *software*, com inúmeras vantagens tanto em tempo como na organização da informação e facilitando a reedição e ou introdução de dados posteriores.

A IG cedida em AutoCAD Civil 3D permite, ao cliente, utilizar um produto vetorial com uma superfície TIN que pode servir de base na construção de um projeto de construção civil, balizamento ou construções de infraestruturas marítimas, cálculo de volumes, entre outros.

Existem outros *softwares* no mercado com capacidades idênticas para construir IG. Nas 'Especificações Técnicas – Produção de Cartografia Hidrográfica', o IH (2009) afirma que as mesmas '*foram criadas de modo a uniformizar a representação e visualização dos objectos, independentemente das aplicações informáticas(...)*'.

#### REFERÊNCIAS

International Hydrographic Organization. (2008). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (5th ed.). Monaco.

<http://www.hidrografico.pt/lei-da-cartografia.php>

Instituto Hidrográfico. (2009). *Especificações Técnicas – Produção de Cartografia Hidrográfica*.

## No caminho de uma nova S-44, reestruturação dos “IHO Standards for Hydrographic Surveys”

C. Monteiro (1), C. V. Marques (1), N. Roscher (2) e R. Carvalho (2)

(1) Inst. Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. E-mail [cristina.monteiro@hidrografico.pt](mailto:cristina.monteiro@hidrografico.pt)

(2) CHM - Brazilian Navy Hydrographic Center (BRASIL)

**Resumo:** O desenvolvimento tecnológico e a utilização de dados de hidrografia para outros fins além da segurança da navegação estão a impulsionar uma reestruturação na classificação dos levantamentos hidrográficos. Assim, a Internacional Hydrographic Organization (IHO) constituiu a Project Team on Standards for Hydrographic Surveys (HSPT) para rever a publicação S-44 ‘IHO Standards for Hydrographic Surveys’ que classifica e define, internacionalmente, os requisitos mínimos para os levantamentos hidrográficos.

Atualmente, discutem-se três abordagens para a próxima edição da S-44: uma abordagem conservadora, mantendo a atual estrutura, preservando a tabela resumo de classificação dos levantamentos (comum às anteriores edições) e acrescentando apenas algumas adaptações; uma inovadora, recorrendo a uma matriz que permite classificar, por critério alcançado, todos os levantamentos e não só os referentes à segurança da navegação; e uma abordagem híbrida mantendo a tabela exclusivamente para efeitos de segurança da navegação, garantindo o foco da atual versão, e acrescentando a matriz para classificar os restantes levantamentos.

**Palavras-chave:** Hidrografia, *Standards*, OHI, S-44, HSPT.

### 1. INTRODUÇÃO

O grupo de trabalho Project Team on Standards for Hydrographic Surveys (HSPT) foi estabelecido em novembro de 2016 na 8ª reunião do Hydrographic Services and Standards Committee (HSSC) da Internacional Hydrographic Organization (IHO) para efetuar uma revisão à publicação especial S-44 ‘IHO Standards for Hydrographic Surveys’, que padroniza internacionalmente os levantamentos hidrográficos.

No HSPT encontram-se representados vários Estados membros da IHO, nomeadamente a Alemanha, Austrália, Brasil, Canadá, Coreia do Sul, EUA, França, Itália, Holanda, Noruega, Perú, Portugal, Reino Unido, Suécia e Turquia; alguns especialistas do sector privado (iXblue, IIC Technologies, ARGANS, Fugro, Gardline Geosurvey, Howlett Hydrographic, Precision Hydrographic) e do ensino universitário (University of New Hampshire, University of Southern Mississippi); observadores da International Federation of Hydrographic Societies (IFHS) e da International Federation of Surveyors; e um representante do secretariado da IHO.

A 5ª edição e última redação desta publicação remonta a fevereiro de 2008, e classifica os levantamentos hidrográficos essencialmente para efeitos de segurança da navegação de superfície, em 4 ordens. O crescente interesse, por parte da comunidade em geral (e em particular pela academia, entidades de gestão territorial e proteção ambiental, sectores privados de exploração de recursos e promotores de atividades desportivas ligadas à náutica de recreio, entre outros) na

exploração e análise de informação batimétrica atualizada, tem feito crescer a prestação de serviços de Hidrografia um pouco por todo o mundo.

A Hidrografia aliada às mais variadas camadas de informação (vegetação, sedimentos, salinidade, temperatura, correntes, habitats, clorofila, etc) permitem uma caracterização do fundo marinho e fluvial de grande utilidade para os mais diversos fins, o que está a impulsionar uma reestruturação na classificação dos levantamentos hidrográficos, de modo a abranger outros objetivos que requerem especificações diferenciadas dos requisitos mínimos definidos atualmente e ajustados para efeitos de segurança à navegação.

O contínuo desenvolvimento dos sistemas de sondagem, nomeadamente dos sondadores multifeixe, interferométricos, LIDAR, satélite entre outros, conjugados, quando aplicável, às plataformas de sondagem autónomas também incitam a uma atualização do conteúdo da atual publicação. Embora, esta se deva manter sempre isenta e independente da tecnologia, deve ser reestruturada de modo a que a classificação dos levantamentos e os respetivos requisitos apresentados possam ser ajustados e alcançáveis pela atual tecnologia.

### 2. S-44 5ª EDIÇÃO FEVEREIRO 2008

Os requisitos mínimos recomendados pela IHO, para cada ordem, encontram-se resumidos na Tabela I da 5ª edição da S-44, adaptada por Artilheiro *et al.*, 2010, onde para além dos critérios de deteção de objetos e busca total do fundo, apresentam ‘as incertezas máximas admissíveis para a medição de

profundidades e para o respetivo posicionamento que são referidas a um nível de confiança de 95%.’ A incerteza vertical é determinada por aplicação da equação:  $\pm\sqrt{a^2+(b.z)^2}$ , em que  $z$  é a profundidade reduzida e os fatores  $a$  e  $b$  referem-se, respetivamente, a erros independentes da profundidade e a um coeficiente multiplicativo para a determinação do erro variável com a profundidade.

Tabela I - Requisitos mínimos dos levantamentos hidrográficos – adaptados da S44 5ª Edição - 2008

Ordem	Máxima Incerteza Vertical	Máxima Incerteza Horizontal	Capacidade de Detecção do Sistema	Máximo Espaçamento entre Fiadas
Especial	a=0,25 m b=0,0075	2 m	Estruturas cúbicas com aresta superior a 1 m	Não aplicável (requerida busca total do fundo)
1	a=0,5 m b=0,013	5m+0,05Z	Estruturas cúbicas com aresta superior a: 2 m, Zd40m 10%Z, Z>40m	Não aplicável (requerida busca total do fundo)
			Não aplicável	Max (25 m ; 3Zmédia)
2	a=1,0 m b=0,023	20m+0,01Z	Não aplicável	3Zmédia

### 3. S-44 – MUDANÇA DE PARADIGMA

Face ao desenvolvimento da tecnologia e ao interesse cada vez maior da comunidade geral nos dados batimétricos, os trabalhos do HSPT começaram por identificar o atual estado de arte da Hidrografia em termos gerais através da partilha de informação dos vários Estados membros e das entidades presentes no grupo de trabalho.

O SHOM apresentou os respetivos processos de controle de qualidade dos levantamentos hidrográficos com recurso a sondadores multifeixe e interferométrico, subscrivendo os requisitos da atual S-44.

O Serviço Hidrográfico Canadano apresentou os *standards* nacionais que acrescentam uma nova ordem às definidas na atual S-44, uma ordem designada por ‘exclusiva’, cujos requisitos mínimos são mais exigentes do que os da ordem especial da S-44, justificando as necessidades que os levaram a considerar esta ordem.

O Serviço Hidrográfico Australiano fez duas apresentações, uma sobre a classificação dos levantamentos no contexto da S-57 em *Category Zones of Confidence* (CATZOC) e outra sobre as necessidades das administrações portuárias.

Foram abordados, pela Fugro as capacidades atuais da tecnologia LIDAR; expostos pela ARGANS os desenvolvimentos no âmbito das técnicas de Derivação de Batimetria a partir de imagens de Satélite (SDB); foi apresentada pela KHOA as potencialidades das plataformas de sondagem

autónomas (UAV) em geral, e em particular as submersas prevendo-se que serão capazes, a curto prazo, de satisfazer valores de incerteza e resolução nunca antes atingidos. Foi efetuada ainda uma apresentação sobre o EMODnet e sobre a importância que a OHI tem reconhecido na utilização criteriosa da *crowd-sourced bathymetry* (CSB).

Tendo em conta o conteúdo das apresentações, o HSPT começou por identificar os pontos críticos da atual edição, quer por estarem desadequados ou desatualizados em relação às novas tecnologias, capacidades e necessidades. Destes, destacam-se os seguintes: a classificação dos levantamentos estar focada na utilização dos dados para cartografia náutica; dificuldade em ter uma visão geral de todos os requisitos; número limitado de definições (ligação com o DQWG e VIM3; desalinhamento entre S-44 e CATZOC (ligação com o S-101WG e DQWG); ausência de padrões para as superfícies batimétricas (ligação com S-102WG); confusão entre estimação de incertezas *a-priori* e a classificação do levantamento *a-posteriori*; a importância do documento permanecer imparcial relativamente às diversas tecnologias; revisão aos metadados; analisar os capítulos desatualizados; transferir os Anexos A e B da S-44 para o C-13 ‘Manual de Hidrografia’.

A discussão, ainda em progresso no seio do HSPT, apresenta três abordagens à nova edição, uma mais conservadora que defende conservar a estrutura atual, preservando a Tabela I acrescentando apenas algumas atualizações de modo a abranger outros fins como por exemplo engenharia e gestão territorial da da orla costeira, conforme figura 1.

The image shows a complex table with multiple columns and rows, representing a proposed format for hydrographic survey classification. The table is divided into sections, with some columns highlighted in blue. The text is small and difficult to read, but it appears to be a detailed technical specification or classification table.

Fig. 1. Imagem da Tabela - Proposta de formato, em discussão no HSPT, para a atualização da tabela que resume a classificação dos levantamentos hidrográficos (futura edição S-44).

Na figura 1, as colunas representadas a azul correspondem às novas ordens criadas para outros propósitos que não a segurança de navegação. As ordens clássicas estão no centro representadas a branco, as da esquerda apresentam requisitos mais exigentes, enquanto as da direita são menos restritivas. Pretende-se apenas ilustrar o formato, nesta fase do desenvolvimento do trabalho o conteúdo ainda não foi abordado, não se encontra perceptível na figura propositadamente.

Uma abordagem mais vanguardista, que defende um formato novo das edições anteriores, que recorre a

uma matriz de classificação de propriedades de forma a abranger todos os levantamentos, e não só os referentes à segurança da navegação.

The image shows a complex matrix with multiple columns and rows, likely representing a classification system for hydrographic surveys. The columns are color-coded and labeled with alphanumeric codes. The rows contain descriptive text for each property. The matrix is divided into several sections, with some cells containing red vertical bars. The overall structure is a grid where each cell represents a specific property and its classification.

Fig. 2. Matriz - Proposta de formato, em discussão no HSPT, que resume a classificação dos levantamentos hidrográficos (futura edição S-44). Pretende-se apenas ilustrar o formato, pelo que o conteúdo não se encontra perceptível na figura propositadamente.

Neste formato, para cada propriedade é definida uma classificação gradual, e a matriz pode conter maior diversidade de propriedades. Todos os levantamentos podem ser classificados através de 1 código alfanumérico (por ex: 5-A7B3D1F3G5) que associa a cada propriedade uma letra e à qualidade alcançada um número, o número inicial (5, no caso do exemplo) corresponde ao número de propriedades verificadas no levantamento. As ordens dos levantamentos, para efeitos de segurança de navegação, continuam a ter requisitos mínimos, para as 4 primeiras propriedades (mandatórias), que se encontram tabuladas através do código de cores. Por exemplo, um levantamento hidrográfico de ordem especial deverá, obrigatoriamente satisfazer as células à esquerda das barras vermelhas nas quatro primeiras linhas.

E uma terceira abordagem, designada por híbrida, defende preservar a tabela exclusivamente para efeitos de segurança da navegação, mantendo o foco da atual S-44 e acrescentar ao documento a matriz para englobar os restantes propósitos. Nesta opção, a tabela corresponde ao representado nas colunas centrais da figura 1 (com o conteúdo apresentado na tabela 1) e com a introdução da matriz (conforme figura 2) poder-se-ia classificar os restantes levantamentos para todos os outros propósitos em função das propriedades alcançadas.

A necessidade de atualização do documento é consensual, mas a forma como essa atualização será efetivada não. O que levou o grupo a conceber um questionário, promovido pelo IFHS, para perceber em que medida é que a atual S-44 está a ser usada pela comunidade em geral, e particularmente pela comunidade hidrográfica e qual a sua opinião em relação à futura edição.

#### 4. S-44 QUESTIONÁRIO

O questionário cobre uma ampla gama de tópicos relacionados com a padronização dos levantamentos hidrográficos. Foi projetado pelo HSPT e

administrado pelo IFHS, tendo sido divulgado pelo IFHS, IHO, FIG e membros do HSPT, entre agosto e novembro de 2017. Foram recebidas 500 respostas, distribuídas internacionalmente conforme figura 3.



Fig. 3. Distribuição internacional das respostas ao questionário sobre a S-44.

A grande maioria das respostas representa o setor de Navegação e Cartografia Náutica, estando as restantes repartidas pelos setores apresentados na figura 4.

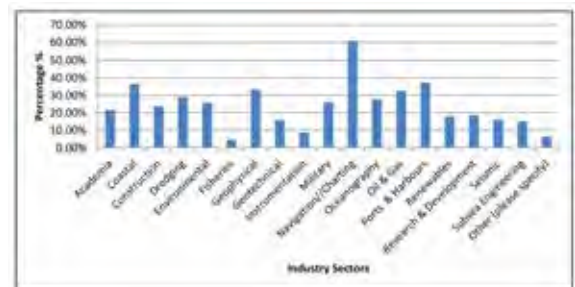


Fig. 4. Distribuição das respostas ao questionário sobre a S-44 em função dos sectores industriais.

Da análise estatística do questionário, o IFHS (2018) (documento não publicado) salientou os seguintes aspectos:

- 45,2% das respostas foram dadas por profissionais certificados Hidrógrafos ou Cartógrafos da OHI (Cat. A / Cat. B);
- As plataformas de sondagem portuárias e costeiras são as mais utilizadas (71,6%) e o uso de veículos autónomos é considerado significativo (Superfície: 22,6%, Subaquático: 24,6%, Aéreo: 15,8%);
- O sistema sondador multifeixe é o principal sensor de sondagem identificado nas respostas;
- 83% dos inquiridos rege-se por um documento normativo baseado na S-44, destes 27% usam um padrão mais restritivo baseado na S-44, 8% usam um padrão menos restritivo e 65% usam a própria S-44;
- Para efeitos de segurança da navegação, 53,5% considera a S-44 suficientemente rigorosa;
- 48,4% dos entrevistados entendem a diferenciação entre os padrões da S-44 e CATZOC, no entanto 55,2% consideram importante clarificar a conexão entre estas duas classificações;
- A maioria (60,8%) considera que a S-44 deve ser estendida para outros propósitos, mas destes 43,6%

defende conservar o foco da S-44 na segurança da navegação;

■ Mais de ¾ dos entrevistados mostraram interesse em incluir diretrizes para levantamentos de controle e verificação das capacidades dos sistemas face aos requisitos da S-44.

■ Mais do que ¾ também gostaria que a publicação apresentasse orientações para outras atividades (*backscatter*, dados da coluna de água, etc).

■ 46,4% das respostas estão a considerar a utilização futura de dados batimétricos de ‘crowd-sourced’.

■ 58% dos inquiridos já usam as profundidades provenientes das superfícies batimétricas em vez das medições (sondas) e 30,4% ponderam fazê-lo no futuro.

Na próxima reunião do HSPT, agendada para julho de 2018, será analisado em pormenor o questionário, tomar-se-á uma decisão em relação ao formato da futura edição e iniciar-se-á a análise em termos de conteúdo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O HSPT está ciente da importância desta publicação, quer na sua aplicação direta pelos serviços hidrográficos oficiais dos 88 Estados membros da IHO, nas responsabilidades que lhes são conferidas no âmbito da produção de cartografia náutica, quer por servir de base à regulamentação nacional, de muitos países, na prestação de serviços de hidrografia e cartografia hidrográfica e conseqüentemente regular as atividades do sector privado da industria.

É importante referir, que independentemente do formato que o HSPT submeter ao HSSC para a 6ª edição da S-44, será obrigatoriamente necessário criar mecanismos de ligação com a edição anterior, para salvaguardar a continuidade e precaver a transição dos procedimentos já instituídos em função da nova classificação.

O desenvolvimento das tecnologias, a procura e o reconhecimento da importância de dados hidrográficos atualizados para muitos outros fins, e a possibilidade de adquirir informação (de alguma qualidade) a custos muito reduzidos, estão a impulsionar a reestruturação da classificação dos levantamentos hidrográficos de forma a serem mais abrangentes.

Neste momento existem três abordagens em discussão para a formatação da próxima edição da S-44, apenas mantendo o formato atual, alternativamente recorrendo a uma matriz mais ampla (nova abordagem) e concorrentemente um formato misto que mantém o formato da 5ª edição exclusivamente para levantamentos efetuados para a segurança da navegação e cartografia náutica e

apresenta a matriz para que todos os outros levantamentos possam ser classificados em função das suas características. Neste último formato (hibrido), os levantamentos hidrográficos para efeitos de navegação e cartografia náutica, continuam isolados dos restantes, de forma a preservar os conceitos e a importância dos requisitos mínimos que lhes foram sendo conferidos nas diversas edições que precederam a atual revisão da S-44, mantendo o foco da publicação, que segundo a maioria dos inquiridos é já suficientemente rigorosa.

Cabe ainda ressaltar, que independentemente do formato, na discussão dos novos padrões para a futura edição da S-44, o HSPT não tem como objetivo substituir padrões preexistentes de organismos nacionais ou internacionais que sejam responsáveis por temas ou tipo de serviços adjacentes à Hidrografia, e sim harmonizar naquilo que os mesmos têm em comum com o ramo da Hidrografia.

## REFERÊNCIAS

IHO (2008). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (5th ed.). Monaco.

[https://www.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/HSSC/HSP/T/General/CL26.pdf](https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/HSSC/HSP/T/General/CL26.pdf).

IHO (2016). Circular Letter 68/2016 20 de dezembro. Composition of the IHO Project Team on Standards for Hydrography.

Artalheiro, F., Silva, R., Monteiro, C. (2010). Contributo para a interpretação dos requisitos dos levantamentos hidrográficos estabelecidos na S-44. *Actas das 1.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 155-158.

## Batimetria do rio Guadiana, um património natural navegável

A. Nunes (1) e C.R.V. Marques (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa. E-mail: [ana.nunes@hidrografico.pt](mailto:ana.nunes@hidrografico.pt); [acatarina.mnunes@gmail.com](mailto:acatarina.mnunes@gmail.com)

**Resumo:** A navegabilidade do rio Guadiana, desde Vila Real de Santo António até Mértola, tem elevada importância para o desenvolvimento turístico local. Com vista à implementação de um canal de navegação que permita o uso de embarcações turísticas de dimensões consideráveis, surgiu o projeto “Guadiana: Património Natural Navegável”, visando a reabilitação da navegabilidade do rio Guadiana no troço internacional, bem como as estruturas portuárias existentes em ambas as margens e os seus acessos. Este projeto decorre do Programa Operativo de Cooperação Transfronteiriça Portugal-Espanha, que integra o Instituto Hidrográfico, a Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos, a Docapesca – Portos e Lotas, S.A. e a Agencia Pública de Puertos de Andalucía. No âmbito deste projeto, o Instituto Hidrográfico tem vindo a efetuar um levantamento topo-hidrográfico no rio Guadiana, apresentando-se, na presente comunicação, os resultados dos trabalhos realizados. Por estar concluída, atribuiu-se destaque à primeira fase, de Alcoutim ao Pomarão.

**Palavras-chave:** Via Navegável do Guadiana, património natural navegável, levantamentos hidrográficos, cartografia hidrográfica.

### 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Desde há muito tempo que a navegabilidade do rio Guadiana, desde Vila Real de Santo António até Mértola, tem uma elevada importância para a ocupação humana ao longo do respetivo vale. Com vista a renovar esta importância, surgiu o projeto “Guadiana: Património Natural Navegável”, com o acrónimo GUAD20, que visa a reabilitação da navegabilidade do rio Guadiana no troço internacional, bem como as estruturas portuárias existentes em ambas as margens e os seus acessos. Este projeto decorre do Programa Operativo de Cooperação Transfronteiriça Portugal-Espanha, que integra o Instituto Hidrográfico (IH), a Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM), a Docapesca – Portos e Lotas, S.A. e a Agencia Pública de Puertos de Andalucía.

A finalidade do projeto consiste num contributo para aumentar a segurança da navegação, promovendo o desenvolvimento da atividade recreativa e turística, de acordo com as diretrizes do desenvolvimento sustentável que o programa promove.

O incremento da segurança da navegação irá fomentar o aumento do número de embarcações de recreio e de cruzeiros a circular no troço internacional do rio, assim como a melhoria da prestação de serviços e desenvolvimento de atividades socioeconómicas relacionadas com o turismo, desfrutando do curso da água, das margens e dos ambientes urbanos, e valorizando os recursos naturais, culturais e patrimoniais da zona.

Como parceiro no projeto, o IH dispõe de ampla experiência, tanto em estudos hidrográficos, como na caracterização de sedimentos e na produção da

cartografia náutica, sendo a entidade responsável pela cartografia hidrográfica em Portugal. Assim, tem como tarefas a cumprir no âmbito do Projeto:

- Realização dos levantamentos topo-hidrográficos (LTH);
- Recolhas de amostras de sedimentos e respetiva caracterização físico-química;
- Estudo do assinalamento fluvial;
- Produção da cartografia náutica.

A informação obtida com base na topografia e na hidrografia permite caracterizar a morfologia do fundo do rio, o que irá proporcionar a elaboração de outros estudos e execução de trabalhos no âmbito do projeto.

A presente comunicação consiste na apresentação dos LTH realizados, por equipas da Brigada Hidrográfica (BH), unidade operacional do Instituto Hidrográfico, no âmbito do projeto “Guadiana: Património Natural Navegável”.

### 2. TRABALHOS REALIZADOS

A primeira fase dos LTH decorreu em outubro e novembro de 2017, entre Pomarão e Alcoutim; enquanto a segunda fase decorreu entre março e maio de 2018, entre Alcoutim e Vila Real de Santo António. O levantamento hidrográfico (LH) na primeira fase foi feito de margem a margem do rio, de forma a permitir definir um canal de navegação, para elaborar o projeto de assinalamento fluvial e sua implementação, após as obras de manutenção entretanto definidas. Na segunda fase, o LTH centrou-se apenas no canal de navegação já existente, e já assinalado.

### 3. LTH no Rio Guadiana – Fase 1

Foram utilizados 2 tipos de embarcações de sondagem, um bote do tipo Zebro II e a lancha *Mergulhão*, com cerca de 7 m de comprimento. A tabela I apresenta um resumo do empenhamento da BH na primeira fase deste projeto.

Tabela I. Trabalho de campo - Fase 1.

Generalidades	
Início dos trabalhos de campo	09-10-2017
Fim dos trabalhos de campo	26-11-2017
Dias de trabalho de campo	49
Apoio/ Topografia	
Dias ocupados	30
Pontos de apoio coordenados <sup>1</sup>	14
Ajudas à navegação fixas coordenadas <sup>1</sup>	9
Hidrografia	
Tempo total de sondagem	124 horas
Tempo total de navegação	205 horas
Distância percorrida sobre perfis	558 km
Área sondada	2,2 km <sup>2</sup>
Nº de sondas adquiridas	148 milhões
Volume de dados	633 Gb

#### 3.1. Sistemas de referência

O posicionamento dos dados de hidrografia foi garantido através de sistemas *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS), que recebem correções diferenciais via satélite, em tempo real, de uma estação de referência instalada em terra. Este método rentabiliza a aquisição de dados e aumenta a respetiva precisão. A utilização deste sistema constituiu, conforme esperado, um desafio neste trabalho, pois requereu a instalação da estação de referência em vários locais. A transmissão das correções para a embarcação é feita através de ondas rádio em UHF<sup>2</sup>. Estas comunicações apresentam várias limitações, devido ao alcance máximo, à orografia do rio, e à falta de acessibilidade aos locais para colocar a antena de comunicação.

O levantamento topográfico (LT) utilizou a informação da Rede Nacional de Estações Permanentes (ReNEP), a fim de ser efetuada a ligação aos sistemas de referência nacionais.

Na altimetria, os dados de topografia foram referenciados ao Nível Médio Adotado (NMA) do mar; enquanto as profundidades obtidas na hidrografia foram referidas ao Zero Hidrográfico (ZH). A redução das sondas observadas ao datum vertical foi efetuada utilizando o método Real Time Kinematic (RTK), com o sistema DGNSS de bordo a receber as correções em tempo real, permitindo calcular a altura da água de forma instantânea.

<sup>1</sup> Coordenações efetuadas com sistemas *Global Navigation Satellite System* (GNSS).

<sup>2</sup> *Ultra High Frequency*.

Paralelamente, e por forma a confirmar que os dados de maré RTK recebidos estavam corretos, instalaram-se marégrafos em Alcoutim e no Pomarão, que mediam os níveis de água no respetivo local. A ligação dos marégrafos e de pontos de apoio (transporte de cotas) à Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão (RNGAP) foi efetuada através de nivelamentos geométricos (ilustrado na figura 1).



Fig. 1. Nivelamento Geométrico.

No Pomarão, onde não existem marcas de nivelamento próximas do local de instalação do marégrafo, realizou-se o transporte de cota com recurso a observações GNSS de longa duração, utilizando a informação disponível da ReNEP para o processamento dos dados.

#### 3.2. Topografia

Foi efetuada a topografia de estruturas portuárias, rampas de acesso ao rio, pontes, postes de alta tensão, e de estruturas consideradas conspícuas para a navegação. Estes trabalhos basearam-se em observações com equipamentos *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e com a estação total.



Fig. 2. Coordenação GNSS de um ponto de apoio.

A figura 2 ilustra a coordenação de um ponto de apoio à topografia.

Adicionalmente, foi utilizado o mesmo método na coordenação das ajudas à navegação (farolins e balizas) no troço entre Alcoutim e Pomarão.

### 3.3. Reconhecimento fluvial

O rio apresenta diversos perigos para a navegação, tais como afloramentos rochosos ou troncos que podem estar submersos ou não, dependendo do nível de água (maré). Deste modo, antes do início do LH, foi efetuado um reconhecimento do troço do rio em causa, com o apoio da Capitania do Porto de Vila Real de Santo António, como apresenta a figura 3. Esta tarefa prévia foi essencial para garantir a segurança das embarcações de sondagem durante o trabalho, tendo sido identificadas zonas cuja aquisição de dados deveria ser feita apenas no estofa da Preia-mar.



Fig. 3. Reconhecimento do Rio Guadiana por via fluvial.

### 3.4. Hidrografia

Os requisitos de sondagem adotados pelo IH para os LH encontram-se definidos pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI), na publicação S-44, sendo classificados como ordem especial e ordens 1a, 1b e 2.

O LH teve as seguintes características:

- Na embarcação *Mergulhão* (figura 4) utilizou-se um sondador multifeixe (SMF), tendo-se cumprido com os requisitos de ordem especial;
- No bote de sondagem, utilizou-se um sondador de feixe simples (SFS), tendo-se garantido os requisitos de ordem 1b, em áreas de profundidade reduzida, nomeadamente, no acesso à barragem do Chança e no interior de cais de atracação.

No LH com SMF, utilizou-se uma sobreposição entre faixas sondadas superior a 50%, garantindo que um mesmo local fosse sondado pelo menos duas vezes em momentos diferentes. Esta opção garante a busca total do fundo, assim como a deteção de objetos com dimensões de 1 metro de aresta, permitindo ainda detetar alterações temporais ou periódicas no fundo.



Fig. 4. LH na embarcação *Mergulhão*.

## 4. CARTOGRAFIA HIDROGRÁFICA

O processamento dos dados hidrográficos foi efetuado através de algoritmos específicos para a hidrografia, nomeadamente, do *Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator* (CUBE), publicado por Calder e Wells (2007). Este algoritmo tem em consideração a incerteza horizontal e vertical de cada sonda observada, a eliminação de erros grosseiros e a minimização de erros sistemáticos. O hidrógrafo do levantamento analisou visualmente e estatisticamente os resultados da estimação da profundidade pelo algoritmo, que originou o modelo batimétrico (MB) e, selecionou manualmente, quando necessário, profundidades mínimas adicionais para garantir a segurança da navegação.

Após o processamento dos dados, foram elaborados os seguintes MB:

- SMF: MB CUBE com resolução de 0,5 m;
- SFS: MB Shoalest Depth True Position (SDTP) com resolução de 0,5m;
- Total: MB combinado entre o MB CUBE e o MB SDTP.

No seguimento deste processamento, os 148 milhões de sondas adquiridas deram origem a 8,8 milhões de profundidades para serem utilizadas na produção da cartografia hidrográfica e para alimentação das bases de dados hidrográficos.

As figuras 5 e 6 ilustram visualizações dos MB.

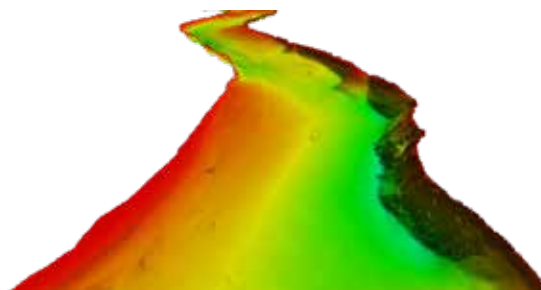


Fig. 5. Imagem batimétrica do leito do rio Guadiana.



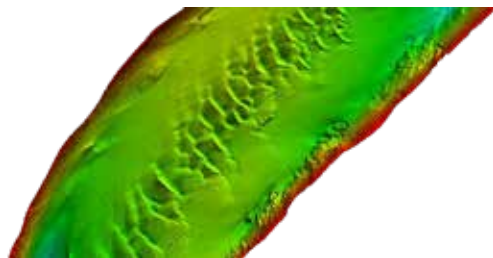


Fig. 6. Imagem batimétrica de ripples no leito do rio Guadiana

A imagem 7 ilustra a visualização de sondas adquiridas pelo SMF.

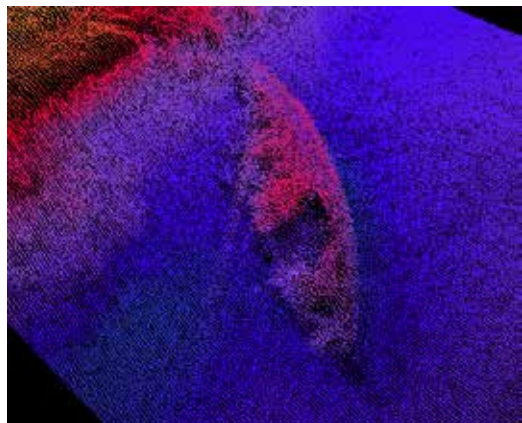


Fig. 7. Visualização de uma embarcação naufragada na margem portuguesa.

Relativamente ao resultado do trabalho de campo, foram elaborados diversos produtos finais:

- MB final, em formato CSAR do software CARIS HIPS, resultante da combinação das superfícies batimétricas, dando prioridade às profundidades do MB obtido com SMF nas zonas de sobreposição de dados com o SFS, considerando a sonda mínima na posição processada;
- Ficheiros de texto, em formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII), com as profundidades e as sondas designadas dos MB finais (latitude, longitude, profundidade e incerteza vertical);
- Ficheiros de imagem do MB final, no formato *Tagged Image File Format* (TIFF);
- Sete implantações gráficas, em que as sondas mínimas têm um espaçamento médio de 4 mm à escala de 1: 2 000, onde foram desenhadas as isóbatas, de metro a metro, determinadas com base no modelo digital do fundo com malha triangular irregular, e onde foi importada a informação topográfica;
- Ficheiro *Computer Aided Design* (CAD), em formato *Drawing Exchange Format* (DXF), com a informação das implantações gráficas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a finalização do projeto GUAD20, é expectável que aumente o número de embarcações de recreio e de cruzeiro no rio. Aguarda-se que se

verifiquem melhorias na prestação de serviços e no desenvolvimento de atividades socioeconómicas ligadas ao turismo, assumindo-se o aumento da segurança da navegação. Por conseguinte, espera-se o aumento do usufruto do rio, das suas margens e dos ambientes urbanos nas proximidades, valorizando assim os recursos naturais, culturais e patrimoniais presentes.

Por parte do IH e, mais especificamente, da BH, a aquisição de dados batimétricos no rio Guadiana, no âmbito do projeto, foi efetuada entre Pomarão e a Ponte Internacional de Vila Real de Santo António, tendo terminado em 05 de maio de 2018. O processamento dos dados, que irá dar origem à respetiva cartografia náutica, está terminado para a 1ª fase, entre Pomarão e Alcoutim, enquanto o processamento dos dados da 2ª fase está a decorrer. Posteriormente, o assinalamento marítimo será estudado de forma a introduzir ajudas à navegação nos locais necessários, e a reavaliar as existentes.

Durante a aquisição dos dados batimétricos, constatou-se que o vale do Rio Guadiana é, de uma forma geral, pouco cavado, facto constatado pelos valores reduzidos de profundidade e pela visualização em 3D dos modelos batimétricos. Adicionalmente, verificou-se que existem diversas embarcações afundadas nas margens que não são visíveis na baixa-mar, estando sempre submersas. Contudo, o facto de estarem nas margens faz com que não representem perigos para a navegação. Foi detetada uma embarcação naufragada no canal de navegação, perto da Foz de Odeleite, o que pode representar um perigo, no entanto, já está sinalizada com uma ajuda à navegação flutuante – uma boia amarela de perigo isolado.

A elaboração da carta náutica irá incluir, para além das sondas mínimas, toda a informação topográfica adquirida, permitindo maior facilidade no acesso aos cais de atracação, e facultando pontos de referência importantes para os navegadores.

## REFERÊNCIAS

- Formulário de Candidatura do Programa Operativo EP - INTERREG V A España Portugal (POCTEP) intitulado “Guadiana: Património Natural Navegável”.
- OHI (2008). S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys. *Organização Hidrográfica Internacional*. 5ª Ed.
- POCTEP (2017). Identificação do projeto “Guadiana: Património Natural Navegável”. <http://www.poctep.eu/es/print/2014-2020/guadiana-patrimonio-natural-navegable>.
- Vicente, J.; Silva, R.; Sanches, P. e Arenga, M. (2012). Revisão das Especificações Técnicas para a execução de Levantamentos Hidrográficos. *2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Instituto Hidrográfico.

## Nearshore bathymetry from surfcam images: a new depth inversion technique

U. Andriolo (1), A. Azevedo (2), R. Taborda (1), D. Mendes (3), E. Sánchez-García (4)

- (1) IDL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. E-mail: [uandriolo@fc.ul.pt](mailto:uandriolo@fc.ul.pt)
- (2) LNEC, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal
- (3) IST-LNEC-IH, Lisbon, Portugal
- (4) CGAT Group, Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

**Abstract:** A novel video-based depth inversion technique was developed to retrieve high resolution nearshore bathymetry data. The methodology was developed and tested with images collected by an online-streaming “surfcam” at Riberia d’Ilhas beach. The features of individual waves trajectories were extracted from the rectified cross-shore Timestacks to compute instantaneous wave celerity, both in the shoaling and surf zones. Nearshore bathymetry was estimated using linear wave theory up to a depth of about 11 m. Results demonstrated the efficiency of the method using short-term video observations (half a tide), obtaining a mean Root Mean Square Error (RMSE) of 0.4 m when compared to conventional methods. Errors are shown to be depth dependent, with smaller absolute error in the surf zone.

**Key words:** video monitoring, wave celerity, ocean, remote sensing

### 1. INTRODUCTION

Nearshore bathymetry is a major coastal feature that influences coastal processes and dynamics. The availability of nearshore bathymetric data is highly required, as it modulates wave characteristics at the coast and beach morphodynamics. One of most widely used technique for acquiring bathymetric data relies on single- or multi-beam echo-sounding sonar systems mounted beneath a ship's hull. As the methodology requires the use of a vessel, the applicability of echo-sounding systems is constrained in shallow waters by the limited water depth and breaking wave process, where surface vessels cannot operate efficiently or safely. Remote sensing techniques such as Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) systems have been applied to survey nearshore bathymetry to overcome vessel use restrictions. LiDAR systems are typically aircraft mounted and determine water depth by measuring the time delay between the transmission of a pulse and its return signal. Due to the costs and logistical difficulties, surveys performed with the abovementioned techniques do not provide the necessary temporal frequency for monitoring the high-dynamic morphological changes occurring in the nearshore zone.

Video remote sensing data has been used to determine nearshore bathymetry through depth inversion technique. The estimation of sea bottom configuration with aerial images started during the Second World War, when such information was necessary to the Allies to land on the coast of Normandy (Williams, 1947). The fundamentals of depth inversion technique rely on the measurement of wave celerity propagation in nearshore, which is used

to solve wave dispersion relation and infer the local depth.

Timestacks are special spatio-temporal images produced over an image sequence acquired by a coastal video-monitoring system. On Timestacks, waves are visible as features of the time-space domain. Therefore, the trajectory of these represents the wave velocity through the sampled transects.

Several methods have been proposed to derive nearshore bathymetry by using video techniques in the last two decades. Focusing on the way to measure wave celerity on Timestack, three main groups of methodologies can be distinguished. These are based on frequency domain analysis (Holman *et al.*, 2013; Stockdon and Holman, 2000), time domain analysis (Liu *et al.*, 2012; Almar *et al.*, 2011), and wave feature detection using image processing techniques (Andriolo *et al.*, 2017; Andriolo *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2012; Catalan and Haller, 2008; Yoo, 2007). A second distinction can be made depending on the adopted method for depth inversion, dividing between the application of linear wave theory (Andriolo *et al.*, 2017; Holman *et al.*, 2013; Stockdon and Holman, 2000) and non-linear wave theory (Almar *et al.*, 2011; Catalan and Haller, 2008; Yoo, 2007).

The existing methodologies have both strengths and weaknesses. On the one hand, the studies that estimated wave celerity in the frequency domain achieved satisfactory results by using depth inversion between 3 m and 10 m depth whereas they lacked in accuracy in the breaker zone near the shoreline. On the other hand, wave celerity computed by time domain analysis required the application of non-linear wave theory to assess good bathymetry

measurement. This means the computation of additional wave parameters such as wave breaking height and wavelength. Overall, the existing techniques were tested in laboratory (Almar *et al.*, 2011, Catalan and Haller, 2008) or during low energy wave (Yoo, 2007). C-Bathy algorithm (Holman *et al.*, 2013) has been extensively used worldwide but the code was never applied for waves bigger than 2 m (Brodie *et al.*, 2018) and showed inaccuracy increasing with wave height.

In such context, this study proposes a novel methodology to estimate nearshore bathymetry based on instantaneous wave celerity using wave visible features on Timestacks. Shoaling and breaking wave domains were treated distinctively to apply two specific formulations for depth inversion. The Timestacks produced from surfcam images collected at a high-energy coastal environment were used to develop and validate the method.

**2. METHOD**

Nearshore wave patterns are measured with the aim of retrieving sea bottom configuration. Fig. 1 shows the workflow of video-based depth inversion technique.

**2.1. Study site**

The collaboration with the company Surftotal (www.surftotal.com) allowed the use of the images acquired by a “surfcam” installed at Ribeira d’Ilhas beach, located at the western Portuguese coast (Fig. 2). The video station consisted in a video camera mounted on a house roof (Fig. 2), distancing approximately 400 m to the shoreline, at a height of about 80 m above Mean Sea Level (MSL).

During two days of campaign (28<sup>th</sup> and 29<sup>th</sup> of March 2017), tide level ranged between -0.94 m and 1.8 m, as two full rising tide phases were monitored. Significant wave height ( $H_s$ ) and peak period ( $T_p$ ) were constant on day 28<sup>th</sup> ( $H_s = 1.7$  m,  $T_p = 11.5$  s), while sea state was more energetic on day 29<sup>th</sup> ( $H_s$  between 2 m and 3.5 m,  $T_p = 17$  s).



Fig. 2. Study site. a) map and camera field of view. b) surfcam installation site. c) original camera frame.

**2.2. Timestacks**

10-min Timestacks were generated over the rectified image sequence extracted from surfcam acquisition video (Sánchez-García *et al.*, 2017; Taborda and Silva, 2012). The time series of pixel intensity were sampled along 14 different cross-shore transects (Fig. 3).

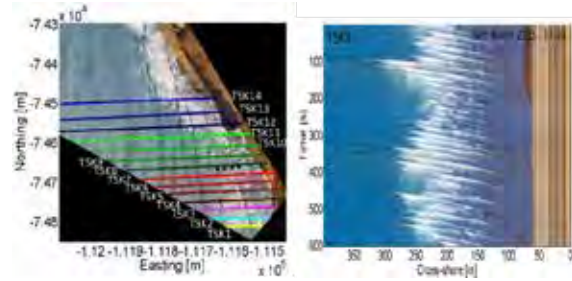


Fig. 3. Transects used for Timestack production plotted on rectified image (left) and example of Timestack image (right).

Timestacks transects covered the area where bathymetry survey was available, extending about 350 m long-shore and 500 m cross-shore. Timestack transects were spaced with an alongshore offset of 25 m and each single transect is analysed through 94 Timestacks. Considering the 14 transects, the whole dataset comprises 1316 Timestacks.

The site was particularly suitable to validate the depth-inversion algorithm as the nearshore area was constituted by non-movable rocky bottom, and detailed bathymetry was available from a LiDAR (Silva *et al.*, 2012) and RTK-GPS survey.

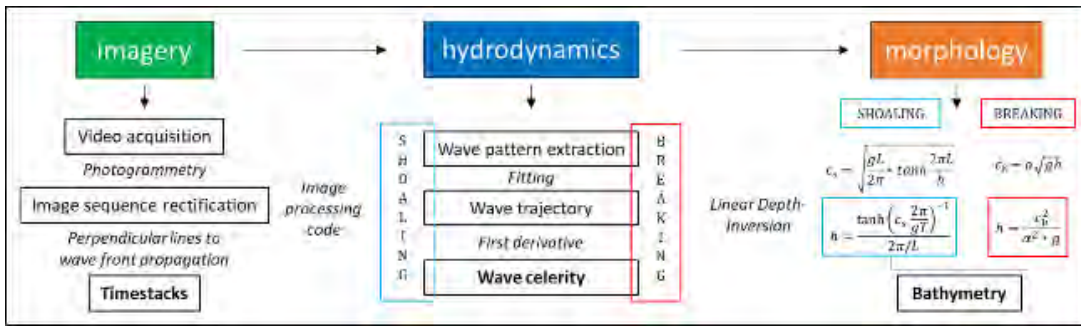


Fig. 1. Workflow of video depth inversion technique.

**2.3. Wave celerity**

An image processing code was built to extract the lines corresponding to shoaling and breaking waves (Andriolo *et al.*, 2017). The final product was a

dataset of spatio-temporal lines representing single wave trajectories through the nearshore area. The dataset comprised both shoaling and breaking waves, separately. Then, the first derivative was computed for each wave trajectories of the dataset to retrieve a

mean wave celerity profile for each 10-min Timestack (Fig. 4). It is based on the physical concept that the first derivative of a spatio-temporal line represents the instantaneous velocity of a point travelling through space.

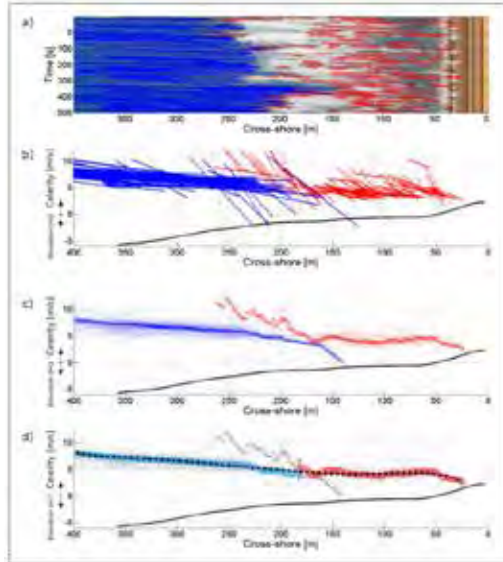


Fig. 4. Sequence of wave celerity measurements. Blue color refers to shoaling celerity, red color to breaking celerity. a) wave features detection algorithm; b) first derivative output plotted over the correspondent beach profile (solid black line); c) median value of shoaling and breaking celerity among all data; d) celerity profile (dashed black line) obtained joining shoaling and breaking celerity, while data plotted in grey were discarded based on the outer/inner surf boundary (horizontal dark grey line at  $x=180$  m).

### 3. RESULTS

#### 3.1. Wave celerity

Figure 5 shows celerity obtained for all the profiles in respect to depth for both days. Shoaling and breaking waves are plotted separately. Measured shoaling celerity was plotted against wave linear dispersion relation expressed in term of the wavelength  $L$ :

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} * \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right)} \quad \text{Eq. 1}$$

where  $L$  is the wave length calculated using the direct method proposed by Hunt (1979),  $g$  is the acceleration of gravity ( $= 9.81 \text{ m/s}^2$ ), and  $h$  is the local water depth.

Breaking celerity was characterized by an average value of  $c_b=4.76 \text{ m/s}$ , comparable to  $c_b = 4.47 \text{ m/s}$  obtained by Postacchini and Brocchini (2014) with the cross-correlation technique from field data.

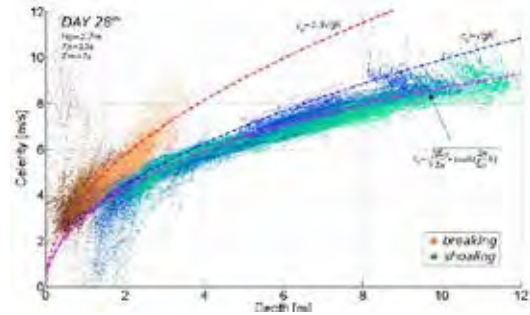


Fig. 5. Wave celerity computed for all profiles plotted versus depth for half a tidal cycle.

#### 3.2. Bathymetry

Fig. 6 shows the example of a bathymetry map achieved with data from half a tide excursion on day 28<sup>th</sup>. Differences with ground truth varied between -1 m and 1 m. The highest positives errors (overestimated depth) located where breaking waves refracted over the irregular shore-platform (southernmost points on the map), while highest negative values (underestimated depth) related with the presence of a local depressions around 6 m depth. Overall, RMSE for the whole area was 0.34 m.

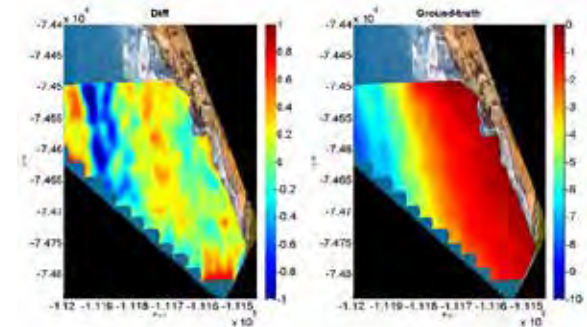


Fig. 6. Difference between survey and video-derive bathymetry (left); and ground-truth bathymetry map (right). Grid resolution is  $1\text{m} \times 1\text{m}$ , obtained from results of 14 transects by using natural neighbours interpolation.

The errors dependence on depth is shown in Fig. 7. Smallest errors are found in the surf zone (from 0 to 3.5 m depth).

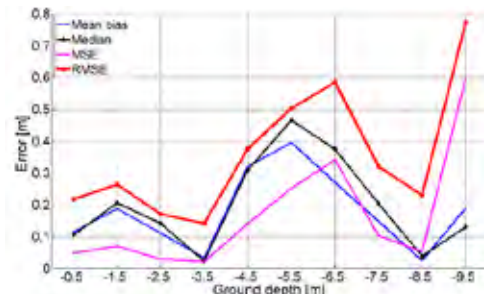


Fig. 7. Variation of video-bathymetry error statistics with depth.

### 4. CONCLUSIONS

This work describes a methodology to video-derive bathymetry on high-energy coastal environments. Results showed the feasibility of the methodology in

retrieving bathymetry within the range of camera view up to a depth of 11 m with short time interval data (half a tidal excursion). The performance was comparable to more sophisticated video-based depth inversion algorithms (Brodie *et al.*, 2018; Holman *et al.*, 2013). Longer acquisitions may provide higher precision in retrieving sea bottom depth.

An advantage of the proposed method is the distinct measurements of shoaling and breaking wave celerity. Although depth inversion using wave linear theory performed well, such division eases the use of non-linear wave theory for depth-inversion in the surf zone under breaking conditions. The main limitations of the technique are common to the previous video-based works related to photogrammetry and video data quality (Uunk *et al.*, 2010). In addition, low wave energy or sea state may affect accuracy and performance, as shoaling and breaking waves patterns would be difficult to detect on Timestacks in such hydrodynamic conditions (Andriolo *et al.*, 2017). Further work will test the technique on complex movable sandy bottom with the presence of a sand bar.

#### Acknowledgements

Umberto Andriolo was supported by the EARTHSYSTEM Doctorate Programme led by Institute Dom Luiz Associate Laboratory (IDL) at the University of Lisbon (SFRH/BD/52558/2014). Elena Sánchez-García is supported by the Spanish Ministry of Education, Culture and Sport grant (state program in I+D+i 2013–2016). The authors gratefully acknowledge the contribution of Dr. C. Lira (IDL, FCUL) and Dr. A. Fortunato (LNEC) during fieldwork. We are also in debt to Pedro Almendra (www.surftotal.com) for camera set up and acceptance in collaborating to this study.

#### REFERENCES

- Almar, R., Cienfuegos, R., Catalán, P. A., Birrien, F., Castelle, B., Michallet, H. (2011). Nearshore bathymetric inversion from video using a fully non-linear Boussinesq wave model. *Journal of Coastal Research*, 64(64), 3–7.
- Andriolo, U., Mendes, D., Azevedo, A., Taborda, R., Silva, A.N. (2017). Bathymetric inversion from video imagery: investigation in the surf zone. *4<sup>th</sup> Estuarine and Coastal Morphodynamics Conference (MEC 2017)*. Porto, Portugal.
- Andriolo, U., Azevedo, A., Nobre Silva, A.M., Taborda, R. (2016). Video imagery technique for wave celerity estimation: results over a rocky-shore platform. *4<sup>th</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisbon, Portugal.
- Brodie, K. L., Palmsten, M. L., Hesser, T. J., Dickhudt, P. J., Raubenheimer, B., Ladner, H., Elgar, S. (2018). Evaluation of video-based linear depth inversion performance and applications using altimeters and hydrographic surveys in a wide range of environmental conditions. *Coastal Engineering*, 136, 147-160.
- Catalán, P. and Haller, M. (2008). Remote sensing of breaking wave phase speeds with application to nonlinear depth inversion, *Coastal Engineering*, 55, 93-111.
- Holman, R., Plant, N., Holland, T. (2013). cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5), 2595-2609.
- Hunt, 1979 Direct solution of wave dispersion equation. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 1979, Vol. 105, Issue 4, Pg. 457-459.
- Liu, H., Arii, M., Sato, S., Tajima, Y. (2012). Long-term nearshore bathymetry evolution from video imagery: a case study in the Miyazaki coast. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33).
- Postacchini, M., and Brocchini, M. (2014). A wave-by-wave analysis for the evaluation of the breaking-wave celerity. *Applied Ocean Research*, 46, 15–27.
- Sánchez-García, E., Balaguer-Beser, A., Pardo-Pascual, J. E. (2017). C-Pro: A coastal projector monitoring system using terrestrial photogrammetry with a geometric horizon constraint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 255–273.
- Silva, M., Patrício, P., Mariano, A., Morais, M. e Valério, M. (2012). Obtenção de Dados LiDAR para as Zonas Costeiras de Portugal Continental. *2<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisbon, Portugal.
- Stockdon, H. F. and Holman, R. A. (2000). Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *Journal of Geophysical Research*, 105033(15), 15–22.
- Taborda, R., and Silva, A. (2012). COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system. *Computers and Geosciences*, 49, 248–255.
- Uunk, L., Wijnberg, K., Morelissen, R. (2010). Automated mapping of the intertidal beach bathymetry from video images. *Coastal Engineering*, 57(4), 461-469.
- Williams, W. (1947), The determination of gradients on enemy-held beaches, *The Geographical Journal*, 109(1/3), 76.
- Yoo, J. Nonlinear Bathymetry Inversion Based on Wave Property Estimation from Nearshore Video Imagery *PhD report of the Georgia Institute of Technology*, 2007.

## Trabalhos Hidrográficos no IH, da necessidade ao produto cartográfico final

Carlos R. V. Marques (1), Cristina Monteiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas, n.º 49, 1249-093 Lisboa. E-mail: [videira.marques@hidrografico.pt](mailto:videira.marques@hidrografico.pt)

**Resumo:** O Instituto Hidrográfico efetua Trabalhos de Hidrografia (TH), onde se incluem os Levantamentos Hidrográficos, Topográficos e Nivelamentos Geométricos, realizados sobretudo para atualização cartográfica ou prestação de serviços.

O procedimento geral para os TH apoia-se em normas técnicas e procedimentos de trabalho, adaptados às especificidades dos levantamentos, e pretende padronizar a execução dos mesmos, garantindo a satisfação dos requisitos mínimos definidos pela Organização Hidrográfica Internacional. Este procedimento geral é transversal a todas as fases dos TH, começando na sua conceção até à entrega dos produtos, prevê o acompanhamento da realização dos trabalhos de campo, do processamento dos dados e da criação de produtos e documentação técnica, acrescentando ainda uma fase para a avaliação de conformidade, processo independente efetuado *a posteriori*, que verifica, para cada TH, se os parâmetros de qualidade foram alcançados, os procedimentos foram respeitados e os respetivos produtos cartográficos estão em conformidade com as normas em vigor.

**Palavras-chave:** Trabalhos Hidrográficos, Avaliação de Conformidade; Cartografia Hidrográfica, Hidrografia

### 1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH) é não só uma instituição militar, mas também um laboratório de estado, e mantém desde há muito uma ampla experiência e qualidade, tanto nos trabalhos e estudos hidrográficos, como na cartografia como produto final. Toda a sua experiência hidrográfica, desde a conceção dos Trabalhos Hidrográficos (TH) até à produção da cartografia hidrográfica, assenta na formação contínua e especializada dos seus recursos humanos, na sua estrutura e organização, assim como na articulação entre a Divisão de Hidrografia (divHI) e o seu braço operacional que é composto pela Brigada Hidrográfica (BH) e pelos Navios Hidrográficos (NH) (figura 1). A BH e os NH são ainda, por excelência as unidades onde os hidrografos finalizam a sua especialização em hidrografia (Categorias A e B)<sup>1</sup> complementando a aprendizagem teórica adquirida na Escola de Hidrografia e Oceanografia com a experiência de campo mínima de 2 anos; é também aqui que são testados os novos equipamentos, técnicas e metodologias sob a supervisão da divHI.

O IH é ainda a entidade reguladora das atividades de produção de cartografia hidrográfica em Portugal, e no exercício das competências que lhe são conferidas pelo Decreto-lei n.º 141/2014 de 19 de setembro, elabora e publica as especificações técnicas para a produção dessa mesma cartografia. Paralelamente é a entidade nacional com responsabilidade exclusiva na produção de cartografia náutica em Portugal e nas águas de responsabilidade portuguesa, fazendo uso primordial da cartografia hidrográfica na sua produção.



Fig. 1. IH e os meios operacionais (BH e NH)

Por forma a garantir a qualidade não só dos dados hidrográficos, como também do respetivo produto final: cartografia hidrográfica, o IH segue rigorosos procedimentos de trabalho que visam regular todo o processo dos TH, desde a identificação da necessidade de efetuar o TH, a conceção das áreas e definição das especificações técnicas (quando aplicável), planeamento, aquisição, processamento, avaliação de conformidade, até à entrega do produto final ao cliente (interno ou externo). Sendo que a maioria dos TH são para utilização interna (atualização cartográfica, estudos geológicos, etc). A aplicação destes procedimentos é constantemente verificada, e atualizada sempre que se identifiquem oportunidades de melhoria.

Este artigo surge, da regular necessidade de verificação e atualização destes procedimentos, aproveitando uma recente reestruturação da organização da HI, e pretende descrever a sua utilização, dando ênfase ao procedimento que serve de base à realização dos TH.

## 2. OS TRABALHOS HIDROGRÁFICOS E OS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Um TH, cujo objetivo principal é, de uma forma geral, a obtenção de dados de hidrografia (figura 2), consiste não só na recolha de dados que permitam saber com o rigor necessário as profundidades do fundo marinho e da zona costeira adjacente, mas também na recolha de informação que permita caracterizar esse mesmo fundo, e adicionalmente topografia das estruturas que possam ser relevantes na área de trabalho (figura 2). Para tal, são ainda necessários nivelamentos geométricos para garantir a ligação ao *datum* vertical adequado, no local do TH. Na realização do TH é ainda importante recolher dados de oceanografia e geologia para complemento e correção dos dados obtidos.



Fig. 2. Trabalhos de campo da BH, LH e LT

No IH, invariavelmente, todos os TH terminam com a elaboração de um produto final, a cartografia hidrográfica, ilustrada na figura 3. A cartografia hidrográfica pode ser explicada, de uma forma muito simples, como a representação fiel da realidade hidrográfica, onde os dados apresentados não sofrem qualquer alteração, ou interpretação relativamente aos dados adquiridos. É um produto cartográfico onde os dados apresentados apenas são sujeitos à supressão necessária para garantir a legibilidade dos valores de profundidade, à escala selecionada, adicionando as linhas isobatimétricas para melhor compreensão da morfologia do fundo, e representando a informação topográfica e geológica necessária ao TH. Na cartografia hidrográfica, a referência vertical é o Zero Hidrográfico (ZH), e por convenção, as profundidades que se situam abaixo do plano do ZH são representadas com sinal positivo. O referencial planimétrico e altimétrico, assim como a escala de representação estão devidamente identificados no produto cartográfico, estando associado a este produto os metadados que permitem identificar todas as fontes de informação utilizadas na sua elaboração.



Fig. 3. Exemplo de um produto de cartografia hidrográfica

## 3. O PROCEDIMENTO UTILIZADO

O procedimento geral para os TH, adotado pela divHI, criado no IH, apoia-se nas normas técnicas e procedimentos de trabalho, também eles elaborados no IH, sendo focados no seu produto final e adaptados às especificidades dos levantamentos hidrográficos. Pretende-se com este procedimento geral padronizar a execução de todas as tarefas relacionadas com os TH, garantindo, no resultado final, a satisfação de todos os requisitos mínimos definidos para o TH, nomeadamente, os requisitos que constam na publicação especial S-44 'IHO Standards for Hydrographic Surveys' pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI,2008), para os levantamentos hidrográficos.

O procedimento detalha os intervenientes e, conforme apresentado na figura 4, expõe o fluxograma desde o início ao fim e termina com a referência aos produtos do TH.

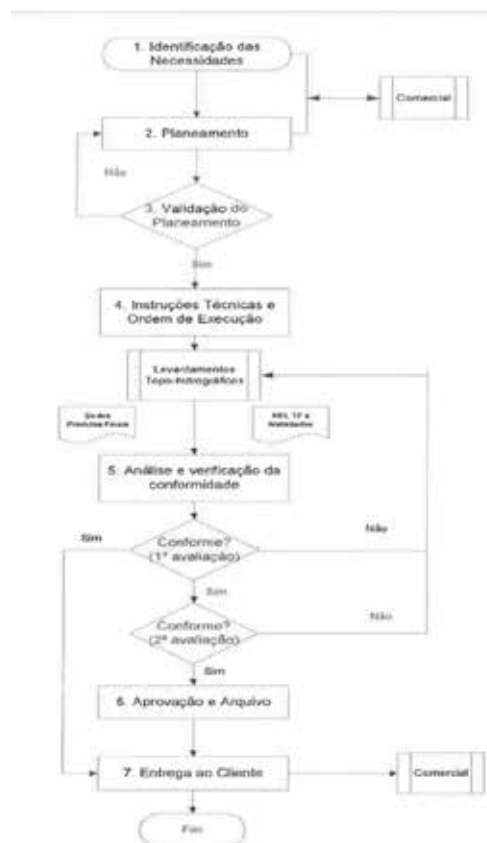


Fig. 4. Fluxograma dos TH

### 3.1. A necessidade

Os TH iniciam-se com a identificação da necessidade de um trabalho específico. Regra geral, os TH têm como ponto de partida:

- i. a necessidade de atualização cartográfica;
- ii. as necessidades operacionais da Marinha;
- iii. o apoio à comunidade científica;
- iv. os protocolos e acordos que possam existir;

- v. a cooperação, por exemplo com PALOP<sup>ii</sup>;
- vi. a prestação de serviços.

Para a divHI, o TH inicia-se com um documento originador, sendo que no caso da prestação de serviços esse documento vem do serviço comercial com um pedido do cliente.

### 3.2. O Planeamento

O planeamento é uma das fases mais importantes, e na realidade divide-se em várias partes. A divHI faz anualmente um planeamento onde agenda os TH previstos (geralmente associado a necessidades dos tipos *i* a *v*), sendo este planeamento aprovado superiormente. No decorrer do ano, novas necessidades vão surgindo e o planeamento vai sendo reajustado.

Inicialmente, paralelamente ao planeamento anual, e apesar de não descrito no procedimento, sempre que surge uma nova necessidade, são efetuadas várias tarefas que permitem chegar à fase final de agendamento do respetivo TH. É necessário definir com rigor a área do TH e estimar o tempo de trabalho quer do Levantamento Topo-Hidrográfico (LTH) quer do TH no total, seguidamente é elaborada uma descrição técnica dos trabalhos a efetuar, e no seguimento desta informação, calculado o respetivo orçamento, para envio ao cliente, ou controlo interno. Com toda esta informação, é agendada a realização do LTH de acordo com a disponibilidade da BH e definidos os prazos de execução do TH.

O planeamento anual, as descrições técnicas, os orçamentos, e qualquer alteração ao planeamento são sempre validadas superiormente pela Direção Técnica (DT) do IH.

### 3.3. As Instruções Técnicas e Ordem de execução

Na fase anterior foi definido o que se pretende fazer no TH e estimado o tempo de execução do LTH, incluindo, tempos para:

- reconhecimento;
- preparação de material;
- trabalhos no campo (aquisição de dados);
- processamento de dados;
- elaboração de produtos finais;
- gestão e arquivo.

Nesta fase, e tendo em conta a descrição técnica elaborada anteriormente e os tempos previstos para a execução, são criadas as instruções técnicas (IT), onde se discriminam as especificações técnicas do TH, e que servem de suporte à BH para a realização do LTH. É ainda criada a ordem de execução (OE), pela (DT), que oficializa o início dos trabalhos, não só para a BH e NH, mas também para todos os órgãos de apoio do IH, onde se identificam as ações

pretendidas e os responsáveis envolvidos no LTH. Com o envio da OE e IT aos destinatários tem início o LTH executado pela(o) BH/ NH, e que se regula por um outro procedimento próprio.

### 3.4. Avaliação da Conformidade

Após terminado o LTH, com os dados adquiridos, processados e validados, e construídos os respetivos produtos finais, incluindo um relatório técnico final (REL TF), elaborados pela(o) BH/ NH, tem início uma fase essencial no controlo da qualidade pretendida pelo IH para os TH, a fase da avaliação de conformidade.

Nesta fase, a divHI efetua a avaliação de conformidade ao LTH realizado pela(o) BH/ NH, que na maioria dos casos é dividida em 2 partes: a primeira parte focada nos dados e produtos finais e a segunda parte focada no REL TF que documenta o LTH. Esta avaliação é efetuada por uma equipa de hidrógrafos experientes que analisam e verificam se todo o TH foi executado e processado em conformidade com as normas em vigor. Para este efeito, a divHI tem formulários específicos como guias de trabalho para garantir que nenhum passo fica por verificar, e onde são registadas notas sobre a avaliação, assim como qualquer não conformidade que necessite de ser reavaliada por parte da BH/ NH, sendo que estes formulários são utilizados em todo o processo da avaliação de conformidade.

Na primeira parte, é avaliada a conformidade dos dados e produtos finais. Para tal é verificado se os dados foram adquiridos e processados de acordo com as normas em vigor, baseadas nas especificações da publicação S-44 (OHI, 2008), e se satisfazem todos os requisitos pré definidos nas IT para o LTH em causa. Esta avaliação é efetuada por amostragem, de uma forma controlada, onde são analisadas fiadas aleatoriamente e subáreas específicas, de modo a garantir que os dados e produtos finais têm a qualidade pretendida. Sempre que se verificarem situações anómalas, ou aspetos a corrigir ou melhorar, estes são comunicados e discutidos com a(o) BH / NH de forma a serem corrigidos ou alterados. Repete-se então a avaliação da conformidade dos dados e produtos finais até que estes se encontrem conformes e prontos a enviar ao cliente.

Após esta primeira fase, que dura, geralmente, entre 3 a 10 dias, os dados e produtos finais podem então ser enviados ao cliente, ficando a divHI a aguardar a entrega do REL TF para iniciar a segunda parte da avaliação de conformidade.

Na segunda parte, é avaliada a conformidade do LTH, focando-se no REL TF e nos metadados. Aqui é, primeiramente, analisado o conteúdo do relatório e cruzada essa informação com os dados e produtos finais já existentes, verificando se todo o LTH está conforme as normas e instruções que regem o TH. De seguida é efetuada uma verificação da grafia e



formato do relatório, garantindo que está, também neste aspeto, de acordo com as normas em vigor. Da mesma forma, qualquer situação não conforme é comunicada e discutida com a(o) BH/ NH, para que se proceda à sua alteração, repetindo-se o processo até que o REL TF se encontre conforme e pronto a entregar ao cliente. Esta parte tem usualmente a duração de 2 a 5 dias.

Para o caso de algum TH comprometer as especificações requeridas após a avaliação de conformidade e caso não seja possível reprocessar os dados, pode ser classificado pela divHI como não conforme, apresentadas as justificações desta classificação, apuradas as condicionantes e responsabilidades e caso se justifique será proposta a repetição do trabalho.

### 3.5. Aprovação, Arquivo e entrega ao cliente

Após a avaliação de conformidade, todo o TH passa por um processo administrativo com duração estimada de 1 a 5 dias. O REL TF é acompanhado de uma Folha de Acompanhamento onde são registados os despachos relativos à avaliação na divHI: pela Hidrografia conforme descrito no parágrafo 3.4, pela Cartografia que verifica a adequabilidade dos dados à atualização da cartografia náutica, pelo Chefe da divHI, e finalmente pelo Diretor Técnico (DT) que posteriormente o leva ao Diretor Geral (DG) do IH para a aprovação.

Após aprovado, todos os documentos relativos ao TH, incluindo a folha de acompanhamento, são arquivados.

Todos os dados solicitados pelo cliente acompanhados do respetivo REL TF, são ainda enviados ao cliente. Sempre que solicitado, os dados e produtos finais, incluindo os produtos de cartografia hidrográfica, são enviados ao cliente imediatamente após a avaliação de conformidade dos mesmos estar terminada.

O ato que encerra o TH é o arquivo da comprovação de entrega dos dados ao cliente, juntamente com todo o TH.

### 3.6. Acompanhamento do TH, Avaliação do desempenho

Durante todo o TH, a divHI discute, sempre que necessário, o planeamento e desenvolvimento dos trabalhos com a BH. Da mesma forma, a divHI mantém informado o cliente sobre a evolução dos trabalhos, garantindo o acompanhamento necessário ao TH.

Para efeitos de controlo, a divHI utiliza um ficheiro pré estruturado que permite acompanhar e controlar cada fase do TH.

Durante o ano, é trimestralmente avaliado internamente o desempenho da divHI na sua atuação, no que aos TH diz respeito. De acordo com essa avaliação são aplicadas as correções que se

julguem necessárias para melhorar esse desempenho. Anualmente é verificado, em janeiro, o desempenho no total da divHI nos TH do ano anterior. Com base nessa avaliação, são redefinidos os objetivos e metas a atingir, no ano seguinte, para efeitos da gestão organizacional da divHI.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, após a deteção da necessidade, é efetuado um planeamento, elaboradas instruções técnicas que regem e dão origem ao LTH. O LTH é efetuado pela BH ou pelo NH, que depois entrega à divHI os dados brutos, processados e validados e os produtos finais, onde se incluem os produtos de cartografia hidrográfica, o REL TF e os metadados. É então efetuada uma avaliação de conformidade aos dados e produtos finais, verificando a garantia de qualidade do TH, após a qual o TH é aprovado, entregue ao cliente e arquivado.

Após esta análise de todo o processo do TH, tal como se entende que deve ser aplicado, e como aqui foi explanado, e da respetiva verificação do procedimento geral, conclui-se que atualmente é necessário efetuar alguns ajustes no procedimento, de forma a melhor espelhar a realidade atual dos TH.

É necessário dar especial atenção ao planeamento, que atualmente se encontra definido de forma mais simplista e que necessita incorporar alguns passos morosos que não estão ainda no procedimento geral, apesar de serem efetuados, como sendo a estimativa do tempo de sondagem, os orçamentos, etc.

Finalmente, tendo recentemente havido uma pequena reestruturação na divHI, o procedimento necessita acautelar as alterações no que diz respeito aos responsáveis nas várias fases.

Adicionalmente, entendeu-se renovar os ficheiros de controlo dos TH, criando um ficheiro interativo, com chamadas de atenção automáticas associadas à calendarização, prevenindo possíveis falhas no TH. No seguimento desta renovação, serão revistos os ficheiros que servem de guia à avaliação de conformidade, ajustando para a existência de novos equipamentos e de técnicas recentemente implementadas nos softwares em uso no IH.

## REFERÊNCIAS

- International Hydrographic Organization. (2008). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (5th ed.). Monaco.
- Instituto Hidrográfico. (2015). Procedimento Geral – Trabalhos de Hidrografia.

<sup>i</sup> Especialização em Hidrografia (Categorias A e B) acreditado pela IHO, pela Federação Internacional de Geómetras (FIG) e pela Associação Internacional de Cartografia.

<sup>ii</sup> PALOP – Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa

# Controlo de qualidade e validação dos dados na produção de cartografia náutica

I. Patriarca (1), A. Alves (1), A. José (1), I. Fortes (1), P. Sanches (1)

(1) Instituto Hidrográfico – Rua das Trinas, 49 1249-093 Lisboa. E-mail: [isabel.silva@hidrografico.pt](mailto:isabel.silva@hidrografico.pt)

**Resumo:** O Instituto Hidrográfico (IH) é a entidade oficial responsável pela produção e atualização da Cartografia Náutica, tendo como objetivo principal contribuir para a segurança da navegação. A plataforma atualmente em utilização no IH – CARIS HPD (CARIS *Hydrographic Production Database*)® - integra o fluxo de informação necessário à produção cartográfica e respetiva atualização. Com o presente artigo pretende-se descrever a metodologia utilizada no processo de controlo de qualidade e validação dos dados que constituem uma fonte fiável no processo de produção cartográfica. Independentemente da área geográfica e da origem da informação, esta metodologia assenta num fluxo de procedimentos com critérios pré-estabelecidos, que a informação geoespacial validada deve cumprir para constituir uma fonte de dados, com vista ao desenvolvimento de uma capacidade de disponibilização da informação e consequente geração dos produtos cartográficos, nomeadamente Carta Eletrónica de Navegação (CEN) e Carta Náutica (CN).

**Palavras-chave:** cartografia náutica, validação, controlo de qualidade, informação geoespacial.

## 1. INTRODUÇÃO

No âmbito da cartografia hidrográfica, o IH é a entidade nacional responsável pela produção e atualização da cartografia náutica, tendo como objetivo principal contribuir de forma efetiva para a segurança da navegação. A Divisão de Hidrografia do IH adotou em 2010 o sistema de produção de Cartografia Náutica CARIS HPD® tendo aplicado um novo paradigma na produção de cartografia baseado num sistema de gestão de base de dados geoespaciais (Patriarca *et al.*, 2016). Esta plataforma integra atualmente todo o fluxo de informação necessário à produção de nova cartografia e assegura a atualização das cartas do fólio cartográfico já produzidas neste sistema em conformidade com as normas nacionais e internacionais da Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Este artigo descreve a metodologia utilizada no processo de controlo de qualidade (CQ), validação e certificação dos dados-fonte, que antecede o processo de disponibilização da informação geoespacial validada para a produção e atualização de cartografia náutica e para a elaboração de outros produtos específicos.

## 2. SISTEMA DE PRODUÇÃO DE CARTOGRAFIA NÁUTICA

No IH a metodologia apresentada adiante assenta no sistema CARIS HPD® que se encontra implementado com base numa arquitetura e ambiente Oracle®, beneficiando das vantagens de um SGBD (Sistema de Gestão de Base de Dados) (Fig. 1). Este sistema é composto por uma fonte de dados que contém a informação geoespacial validada, a partir da qual se obtêm os produtos cartográficos CEN e CN (Fig. 2), por meio de um conjunto de procedimentos operacionais, conforme se encontra já apresentado em Patriarca *et al.* (2016).



Fig. 1. Estrutura do Sistema de Produção Cartográfica no IH (adaptado de Patriarca *et al.* (2016))

### 2.1. Dados de entrada do sistema de produção cartográfica

Os dados de entrada no sistema de produção cartográfica são a informação geoespacial fonte que se encontra armazenada na infraestrutura da fonte de dados do sistema HPD (Fig. 1). Após o processo de CQ descrito adiante no presente artigo, estes dados são validados, certificados e constituem a fonte de informação geoespacial fiável disponibilizada em tempo útil para atualização e construção dos produtos cartográficos CEN e CN (Fig. 2) e também para integrar Produtos Cartográficos Especiais (PCE) que atendem a necessidades específicas de alguns utilizadores. O processo de gestão destes dados no que diz respeito à edição, atualização, validação e CQ dos objetos geográficos fonte, converte-os em informação fonte, também designada por dados-fonte, constituindo os dados-origem dos produtos cartográficos, sendo por isso também designados por “dados cartográficos” (Fig. 2). A informação geoespacial fonte está armazenada na infraestrutura da fonte de dados do sistema de produção cartográfica HPD do IH (Fig. 1). Esta infraestrutura pode também ser designada por “Dados Cartográficos”, conforme mostra a Fig. 2.

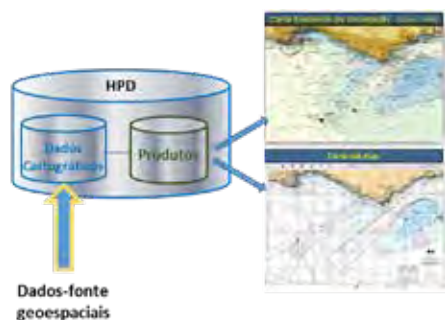


Fig. 2. Sistema de Produção Cartográfica no IH

É sobre estes dados e nesta infraestrutura do sistema de produção cartográfica que vai incidir a metodologia apresentada neste artigo no que diz respeito ao processo de CQ e validação dos dados-fonte. Pretendeu-se, com a sua implementação, assegurar a validação e certificação daquela informação após o cumprimento de vários requisitos do processo de CQ. É nesta infraestrutura de “Dados Cartográficos” do sistema de produção cartográfica (Fig. 2), que reside toda a informação em vigor publicada, devidamente atualizada e certificada, a aguardar a construção de novas atualizações e novas edições de CEN, CN e PCE. Este processo de CQ e validação dos dados-fonte foi desenvolvido na Divisão de Hidrografia do IH.

## 2.2. Modelo de dados segundo o Standard S-57

O modelo de dados dos dados de entrada do sistema de produção cartográfica suporta objetos do mundo real cuja descrição e características espaciais se baseiam no formato de dados S-57 (Fig. 3), estabelecido pela OHI segundo a norma S-57 - “IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data” (IHO, 2000b). No processo de CQ, validação e disponibilização dos dados-fonte para construção dos produtos cartográficos, a informação geoespacial fonte tem obrigatoriamente que cumprir determinados requisitos específicos no que diz respeito ao *standard* S-57, nomeadamente em relação aos objetos e atributos S-57 e à geometria destes geo-objetos que modelam o mundo real para uma dada área geográfica. Os dados-fonte encontram-se distribuídos por dois grandes grupos de geo-objetos S-57: Grupo 1 denominado “Skin of The Earth” e Grupo 2, que são todos os geo-objetos S-57 da área geográfica que não pertencem ao Grupo 1 (IHO, 2000a). O cumprimento de todos os requisitos implementados no processo de CQ do sistema de produção cartográfica HPD no que diz respeito aos dados-fonte e em particular aos dois grupos de objetos referidos anteriormente, permite a disponibilização imediata destes dados para utilização na construção dos produtos CN (formato papel) e CEN (formato digital S-57).



Fig. 3. Exemplo de representação dos dados-fonte segundo o Standard S-57 no Sistema de Produção Cartográfica do IH

## 3. METODOLOGIA DE CONTROLO DE QUALIDADE E VALIDAÇÃO DOS DADOS

A metodologia utilizada para validação dos dados-fonte, tem em conta três fases distintas (Fig. 4). O processo de validação e CQ destes dados integra uma fase de *Revisão* da área geográfica de interesse, seguida de duas fases de *Verificação*, em que na segunda verificação é utilizado um conjunto de dados-fonte por amostragem, correspondendo à fase de *Validação* desses mesmos dados (3ª Fase). Cada uma destas fases é realizada por diferentes operadores (Fig. 4).



Fig. 4. Processo de CQ e validação dos dados – fonte no Sistema de Produção Cartográfica HPD

Primeiramente são definidos os objetivos da *Revisão* e das *Verificações* da informação existente na infraestrutura de dados-fonte geoespaciais para a(s) área(s) geográfica(s) de interesse (Patriarca *et al.*, 2016). Na fase de *Revisão* a informação deve passar pelas ferramentas de CQ automáticas disponíveis no HPD (*Validation Checks*) para serem corrigidos os eventuais erros relacionados com a estrutura (exemplo: geometria, topologia), com o “ENC product specificaton” (exemplo: atributos) ou com o Catálogo de Objetos entre outros. As verificações incidem sobre os dois grupos de objetos S-57 já referidos: Grupo 1 (“Skin of The Earth”) e Grupo 2

(IHO, 2000a). Para todos os objetos S-57 da infraestrutura da fonte de dados do HPD que pertencem ao Grupo 2, a informação será verificada por temas, de modo que cada camada de informação passe por todo o processo de CQ e possa ficar disponível para iniciar a construção dos produtos CEN e CN. Os temas são: “Ajudas à Navegação”, “Informação Terra” e “Informação Mar”. Em cada fase do processo de CQ os dados-fonte passam por vários estados denominados “*Certification Status*” que variam entre *Under Construction* e *Verified* (Fig. 5), sendo atribuído o estado de *Verified* na sua condição final sendo que, só nesta condição os dados serão visíveis para a produção e para serem integrados nos produtos cartográficos PCE, CEN e CN (Patriarca *et al.*, 2016).



Fig. 5. CQ dos dados – fonte → Ciclo de Certification Status

### 3.1. Fase de Revisão da Informação fonte

Para uma dada área geográfica e de acordo com o planeamento cartográfico ou face a uma necessidade específica de criação de produto, a fase de *Revisão* da informação fonte tem por objetivo assegurar que toda a informação na infraestrutura da fonte de dados está conforme todos os critérios de validação (Fig.4). Na primeira fase do processo de CQ, é feita a consulta de várias fontes de informação: CN e CEN's em vigor, informação proveniente de entidades oficiais como, por exemplo, a Direção Geral do Território (DGT), os Municípios ou as Administrações Portuárias entre outras. São efetuadas ações de recolha, compilação, escolha da informação, edição, construção e representação, completando e atualizando os dados-fonte na infraestrutura da fonte de dados do sistema. Em seguida procede-se a uma avaliação comparativa entre a fonte de informação e a carta em vigor, caso exista (Fig. 4), verificando a omissão de geo-objetos S-57 que modelam a área geográfica a trabalhar e a respetiva classificação dos mesmos, assim como a conformidade semântica, assegurando que todos os objetos e atributos S-57 codificados estão conformes com as normas da OHI (IHO, 2000a; 2000b). Nesta fase, são utilizadas as ferramentas automáticas de CQ do HPD e corrigidos os erros detetados nos dados-fonte. Destacam-se entre outros, os seguintes *Validation Checks*: *Duplicate Objects*, *Invalid Geometry*, *Overlapping Areas*, *S-58 Depht Areas and Depht Contours*, *S-58 Group 1 Area Coverage*, etc (IHO, 2017). Os testes de CQ indicam situações a evitar e a corrigir na geometria dos objetos S-57, na codificação de objetos e atributos S-57 e na cobertura da área geográfica pelos objetos S-57 área do Grupo 1. Após esta ação, o estado da informação

passa de *Under Construction* para *Not Verified* através da ação *Submit* feita na fase de *Revisão* da informação (Fig. 5).

### 3.2. Fase de Verificação da Informação fonte

A primeira *Verificação* do processo de CQ aos dados é feita tendo em vista especificações de construção de produto CEN ou CN e tem por objetivo a verificação e análise da informação. A *Verificação* será feita pelos temas já referidos no ponto 3 em que para cada tema é efetuada uma verificação visual cuidada por um operador diferente da primeira fase de *Revisão* (Fig. 4) e é feita a comparação com a fonte de informação carta em vigor onde é observada a omissão de algum objeto S-57 que não esteja codificado na infraestrutura da fonte de dados do HPD. Os objetos geográficos tipo área “*Skin of The Earth*” (Grupo 1) são verificados na sua adjacência devendo cobrir toda a área geográfica de um futuro produto sem que haja sobreposição entre eles (Patriarca *et al.*, 2016) e devem estar codificados em termos de modelação por geo-objetos segundo as normas S-57 da OHI (IHO, 2000a; 2000b).

#### 3.2.1. Critérios de validação dos dados-fonte

A primeira *Verificação* revê a codificação dos geo-objetos e seus atributos S-57 (Fig. 4), tanto para os objetos do Grupo 1 como para os objetos do Grupo 2, em como estão conformes segundo as normas internacionais (IHO, 2000a; 2000b). Em seguida é feita uma verificação à representação dos geo-objetos em termos de geometria (Área, Pontos, Linhas ou Sondas). No caso em que os geo-objetos são do tipo ponto (ex: pontos coordenados, luzes, etc.) a verificação incide na exatidão posicional dos mesmos (Fig. 4), mediante a fonte de informação das coordenadas (ex: Fichas de Pontos Coordenados, informação e-mails de entidades oficiais, etc.). Se a posição geográfica destes objetos estiver conforme e após a informação ter passado sem erros nas ferramentas automáticas de CQ HPD, nesta etapa o estado da informação fonte é alterado para *Verified* (Fig. 5), considerando-se estar validada e certificada após a fase seguinte do processo de CQ, ficando então disponível e visível para integrar os produtos. Se os dados-fonte não estiverem conformes após a fase de *Verificação*, permanecem em estado *Not Verified* e voltam ao início do processo CQ e à fase de *Revisão* para edição e compilação (Fig. 4), retomando o estado *Under Construction*. Após novo *Submit* na fase de *Revisão*, os dados que sofreram correção no processo de validação e CQ entram de novo no ciclo de certificação - *Certification Status* - até adquirirem o estado de *Verified* (Fig. 5). Sempre que existe uma área representada a várias escalas, isto é, uma área geográfica com informação que tenha representação em diferentes bandas de escalas - “*Usage Bands*” (Patriarca *et al.*, 2016), os geo-objetos S-57 da área geográfica de interesse são ainda verificados em termos da sua consistência

vertical (Fig. 4) e correspondência correta em termos de representação e generalização entre as diferentes escalas (Fig. 6).



Fig. 6. Níveis de Generalização em diferentes Usage Bands

Considerou-se adequado implementar três níveis de generalização, para cumprimento da consistência vertical (Sanches, 2017).

### 3.3. Fase de Validação da Informação fonte

Após a inserção das correções sugeridas na fase de *Verificação*, os dados-fonte voltam a ser submetidos à verificação e análise da conformidade numa segunda verificação e *Validação* (Fig. 4), com um operador diferente das duas fases anteriores ligado à construção dos produtos CEN ou CN. Na fase de *Validação* dos dados será efetuado todo o processo descrito anteriormente mas sobre um conjunto de geo-objetos escolhido por amostragem (Fig. 4). No final de todo este processo, os dados-fonte passam pelos responsáveis de produção de informação S-57 CEN para revisão e ficarão validados, certificados, disponíveis e visíveis para os futuros produtos, com estado *Verified* (Fig. 5) em todos os objetos S-57 da área geográfica de interesse. Ao longo do processo de CQ e validação dos dados-fonte, é realizado um registo das verificações efetuadas onde consta a identificação dos operadores responsáveis pelas fases de *Revisão*, *Verificação* e *Validação* da área geográfica, os critérios de validação, o *Certification Status* de cada objeto S-57 com a respetiva data e etapas da verificação.

### 3.4. Um exemplo prático

Modelação de uma baliza, por meio do geo-objeto BCNLAT (Fig. 7) e o ciclo de *Certification Status* (Fig. 5): BCNLAT → *Under Construction* → *Submit* →

*Not Verified* → *Submit* → *Verified*

Só os dados-fonte com o estado *Verified* ficam visíveis, disponíveis e podem ser integrados nos produtos cartográficos CEN, CN, PCE, etc.



Fig. 7. Validação do objeto S-57 Baliza - BCNLAT (Chim, 2012)

## 4. PERSPECTIVAS FUTURAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de CQ dos dados-fonte utilizados na produção cartográfica torna a informação S-57 e metadados associados em informação fiável de modo a obter-se informação fonte disponível para utilização imediata no processo de construção e atualização dos produtos cartográficos oficiais do IH. Os dados-fonte ficam validados e certificados, permanecendo disponíveis para serem editados logo que necessário para atualização cartográfica e para construção de novos produtos cartográficos, quer para o Fólio Nacional quer para o Fólio Internacional (cartas da série internacional INT). Atualmente este processo encontra-se já operacional no sistema de produção cartográfica do IH. Num futuro próximo as áreas geográficas de Portugal Continental, Açores, Madeira e Cabo Verde terão todos os seus dados-fonte (geo-objetos S-57 que modelam as entidades do mundo real e correspondentes metadados) devidamente validados e certificados segundo esta abordagem neste sistema de produção cartográfica do IH. Na construção das novas edições de CEN e CN que cobrem as zonas geográficas do território nacional, eventualmente com novos limites e PALOP (Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa), o processo de validação a utilizar seguirá a metodologia descrita anteriormente. Posteriormente este processo poderá ser aplicado a outras áreas geográficas já cartografadas e da responsabilidade do IH e já contempladas no esquema de produção cartográfica.

## REFERÊNCIAS

- Chim, V. (2012). O S.I.G. na Cartografia Náutica. *I Colóquio de Sistemas de Informação Geográfica: Tendências*. Sociedade de Geografia de Lisboa, Lisboa, 3 e 4 de Dezembro de 2012.
- IHO (2000a). *S-57 Appendix B.1 – ENC Product Specifications*. Edition 2.0.
- IHO (2000b). *S-57 – IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*. Edition 3.1.
- IHO (2017). *S-58 – IHO Recommended ENC Validation Checks*. Edition 6.0.0.
- Patriarca, I., Sanches, P., Moura, A., Manuel, A., Cardoso, J. (2016). A produção de cartografia náutica a partir de um sistema de Base de Dados. *Actas das 4ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 21-23 Junho*, 397-400.
- Sanches, P. (2017). *HPD User Group Meeting*. Texto não Publicado, Ottawa, Canada, 19-20 June.

# Utilização de imagens multiespectrais no apoio a obras marítimas: reforço do cordão dunar da Ilha de Tavira/Praia do Barril

C. Sousa (1)

(1) SOFAREIA, S.A. claudiosousa@sofareia.com

**Resumo:** O uso de imagens multiespectrais na delimitação de zonas costeiras ou estimação de profundidades em zonas de água rasa tem tido boa aceitação como parte de projectos de reconhecimento ou preparação de levantamentos hidrográficos. A Ria Formosa caracteriza-se pela presença de um cordão dunar litoral que protege uma zona lagunar e o seu reforço artificial integra-se actualmente num conjunto de acções de combate à erosão costeira com recurso a areia proveniente de dragagens. Este tipo de obras marítimas requer uma actualização frequente da informação batimétrica, obtida através de levantamentos hidrográficos com recurso a sondadores acústicos. Atendendo ao carácter extremamente dinâmico deste ecossistema, é necessário dispôr de meios que permitam estimar profundidades em áreas de grande extensão, num curto espaço de tempo. Neste artigo será apresentada a utilidade das imagens multiespectrais obtidas por satélite e UAV, para dedução de batimetria e planeamento de estratégias de apoio a obras marítimas.

**Palavras-chave:** imagens multiespectrais, detecção remota, levantamentos hidrográficos, reforço dunar, dragagens

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação de profundidades é fundamental para a caracterização da topografia subaquática em operações de dragagem ou outras obras marítimas, estudos ambientais, modelação e acompanhamento de processos de erosão ou sedimentação. No entanto, a aquisição de dados espaciais através de sondadores acústicos é, além de dispendiosa, exigente em termos logísticos. Com o advento da fotografia aérea e das missões espaciais de observação terrestre, e após as primeiras utilizações de imagens aéreas de zonas marinhas de água límpida e rasa, reconheceu-se que a profundidade poderia ser estimada de alguma forma através da detecção remota. Apresentando-se como um método indirecto, esta permite obter modelos batimétricos de áreas relativamente extensas, partindo de um conjunto inicial de profundidades muito reduzido e discreto e, embora estes modelos não alcancem os requisitos dos levantamentos hidrográficos tradicionais, os dados assim obtidos podem ser usados para avaliar áreas onde seja requerido um grande nível de pormenor, a ser obtido por sensores de alta resolução, como o SONAR (*SOund NAvigation and Ranging*).

## 2. REFORÇO DO CORDÃO DUNAR DA ILHA DE TAVIRA/PRAIA DO BARRIL – PROJECTO DE EXECUÇÃO

Os trabalhos do projecto referem-se essencialmente ao reforço do cordão dunar da Ria Formosa num extenso troço das Ilhas Barreira, na zona denominada “Praia do Barril”. A intervenção nesta zona justifica-se, atendendo ao facto de que não existe uma verdadeira faixa de areia em estabilização, sendo as cotas da duna particularmente baixas e encontrando-se a face voltada para a ria muito recortada por canais

perpendiculares à linha de costa, que poderão abrir para a praia, quebrando a estabilidade do cordão. Não se efetuando o reforço, esses canais poderão transformar-se em pequenas “barras de areia” de difícil controlo, devido a condições desfavoráveis de agitação marítima. Simultaneamente e devido às operações de dragagem de manutenção da barra da Armona, a servir como “zona de empréstimo” para obtenção de 300000 m<sup>3</sup> de sedimentos arenosos para reforço do cordão dunar, pretende-se proporcionar uma maior hidrodinâmica lagunar nas áreas de influência do “prisma de maré” desta barra, através do aumento da taxa de renovação da água. Essa benfeitoria permitirá o melhoramento das condições de navegação na barra e canais de exploração de aquacultura, o aumento da circulação de nutrientes, uma menor concentração de produtos poluentes e também, maior disponibilidade de oxigénio na coluna de água. Os principais trabalhos a executar são, por ordem cronológica: levantamento topo-hidrográfico inicial com recurso a sondadores acústicos (Figs. 1 e 2), dragagens no Canal da Culatra, Esteiro da Barra Grande e Barra da Armona com recurso a dragas hidráulicas de corte e sucção, reforço do cordão dunar da Praia do Barril através de “linhas” de descarga, levantamentos topo-hidrográficos de controlo nas zonas de intervenção de dragagens e levantamento topo-hidrográfico final.



Fig. 1. Área dos levantamentos topo-hidrográficos na zona de reforço. Fonte: Google Maps, 2018.



Fig. 2. Área dos levantamentos topo-hidrográficos na zona de dragagens. Fonte: Google Maps, 2018.

### 3. A DETECÇÃO REMOTA NO APOIO A OBRAS MARÍTIMAS

A execução de levantamentos hidrográficos com sistemas de sondagem acústicos obriga a um planeamento prévio que deverá ter em conta diversos factores. Além da escolha de meios marítimos adequados ao local de sondagem, este tipo de operações necessita de apoio externo, que pode incluir a instalação de marégrafos, estações de referência GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e meios de transporte terrestre, entre outros. As condições climáticas também condicionam bastante a execução destas tarefas. A disponibilidade de recursos materiais e humanos na estrutura de uma empresa - e no contexto de uma obra marítima de grande extensão e com diversos sectores activos em simultâneo - é sempre limitada e obriga ao desenvolvimento de estratégias para gestão de actividades e custos, que de outra forma, são muitas vezes desnecessários. Com a necessidade de se gerir essas actividades, a utilização de imagens multiespectrais provenientes de satélite e/ou UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) para estimação de batimetria tem sido constante, tanto para observação da evolução dos trabalhos de dragagem como para planeamento de levantamentos hidrográficos e escolha dos meios mais adequados à sua execução.

### 4. BATIMETRIA DERIVADA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS

A capacidade de derivar batimetria através de técnicas de detecção remota é um tema de crescente

interesse no âmbito científico, tendo sido já demonstrado por diversos autores. Pacheco *et al.* (2014) realizaram experiências para a zona da Ria Formosa (Faro) com base no algoritmo de transformação linear desenvolvido por Lyzenga (1978), que se revelou um método rápido e fiável para aquisição de informação batimétrica actualizada, para grandes áreas e até profundidades de 12 metros relativas ao Nível Médio do Mar, permitindo uma observação, tanto da praia submersa como da costa. Em 2016, Guerreiro e Moura demonstraram as vantagens e limitações da aplicação da metodologia desenvolvida por Stumpf *et al.* (2003) a imagens Landsat 8 OLI e Sentinel-2A MSI, da qual resultaram modelos batimétricos capazes de representar a morfologia do fundo, até profundidades inferiores a 10 metros.

No âmbito deste projecto têm sido utilizadas imagens orbitais Sentinel 2A-MSI, além de outras obtidas por UAV. O método adoptado para o processamento das imagens é semelhante ao usado pelos Serviços Hidrográficos e Oceanográficos da Marinha Francesa para produção de cartografia das ilhas francesas (Laporte *et al.*, 2015) e consiste numa metodologia mais simples e rápida que utiliza apenas uma banda do visível para o estudo da coluna de água (banda do verde) e permite produzir um modelo simples, comparando-se a imagem com uma amostra de profundidades “precisas” obtidas através de levantamentos hidrográficos com um sistema de feixe simples. Partindo do princípio que as condições dominantes na atmosfera e coluna de água são constantes, o modelo é generalizado a toda a imagem e as camadas de profundidades podem ser geradas com um nível razoável de confiança.

### 5. IMAGENS ORBITAIS

Previamente ao início dos trabalhos de dragagem e reforço dunar foram realizados levantamentos hidrográficos com um sistema de feixe simples, nas zonas de intervenção. Os dados obtidos permitiram aferir os volumes de escavação e aterro, comparando-os aos levantamentos que serviram de base à definição do projecto. Algumas semanas após o início das operações de dragagem (Fig. 3) já era visível do espaço a localização e evolução desses trabalhos (Fig. 4). No início de Março as condições climáticas adversas obrigaram a suspender todas as actividades.

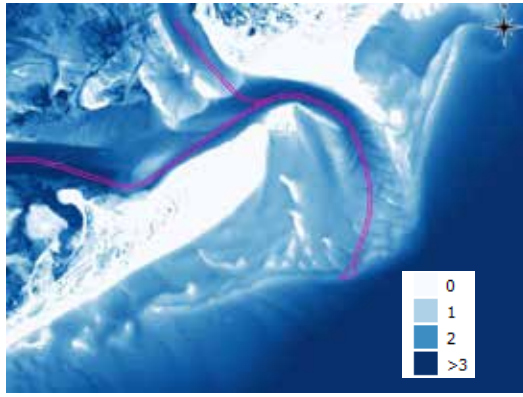


Fig. 3. Batimetria derivada de imagem de satélite S2A-MSI em Dezembro de 2018 à qual é sobreposto o projecto de dragagem (profundidades relativas ao ZH, em metros).

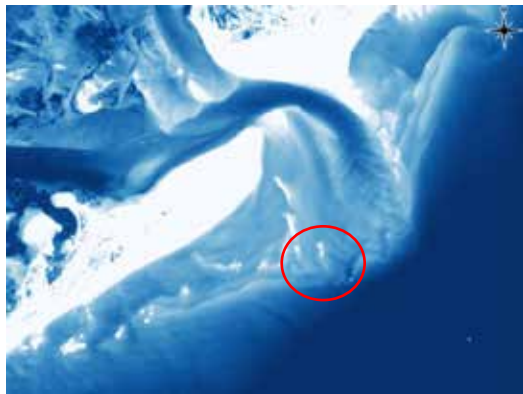


Fig. 4. Início do canal de dragagem já visível em Fevereiro de 2018. No geral, a morfologia do fundo mantém-se idêntica à imagem anterior.

Após a passagem da tempestade foi possível observar numa imagem de satélite, alterações na morfologia do fundo da Barra da Armona e, conseqüentemente, um deslocamento do canal já dragado, para Este (Fig. 5).

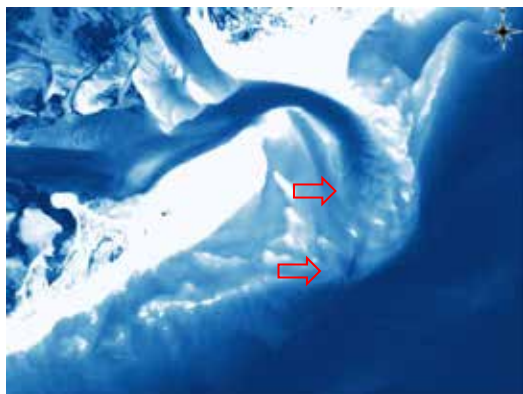


Fig. 5. Imagem de satélite obtida em 21 de Março de 2018. Após a tempestade houve uma movimentação das estruturas do fundo no sentido Oeste-Este e o canal já dragado acumulou alguma sedimentação.

O estudo destas imagens sugeriu que a forte dinâmica deste sistema lagunar dificilmente permitiria a manutenção de uma abertura naquele local, pelo menos com as dragas disponíveis, e à cota definida para o projecto (2 metros de profundidade relativas ao ZH); isso conduziu a uma mudança nos planos de trabalhos de dragagem. Também na Praia do Barril, e

devido à tempestade marítima, o volume de reforço já realizado (cerca de 60000 m<sup>3</sup>) foi totalmente eliminado. Atendendo ao calendário das obras, foi sugerida como estratégia, a colocação de uma draga estacionária em frente à praia, de forma a retirar-se do fundo a areia que se julgava ter sido levada pelo mar, mas que estaria na proximidade. Seria necessário primeiro realizar um LH em toda a extensão da praia (cerca de 2500 m), o que obrigaria a uma deslocação de meios necessários em outros locais e também, a custos adicionais. A observação de duas imagens de satélite permitiu perceber que a tempestade tinha levado grande quantidade de areia da praia também na zona submersa, pelo que essa estratégia foi abandonada (Figs. 6 e 7). Os LH programados para mais tarde haveriam de permitir atestar esse facto.

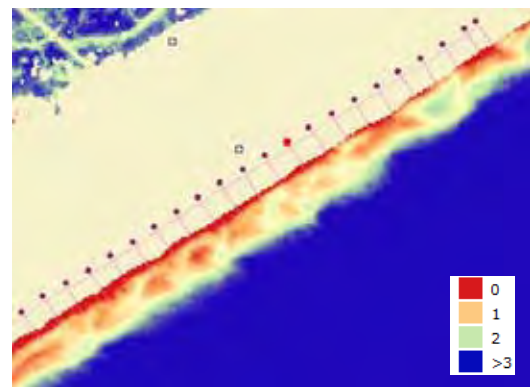


Fig. 6. Batimetria derivada de imagem S2A-MSI (16 de Fevereiro de 2018). Na Praia do Barril, em frente à zona de intervenção, destaca-se a morfologia do fundo (profundidades relativas ao ZH, em metros).

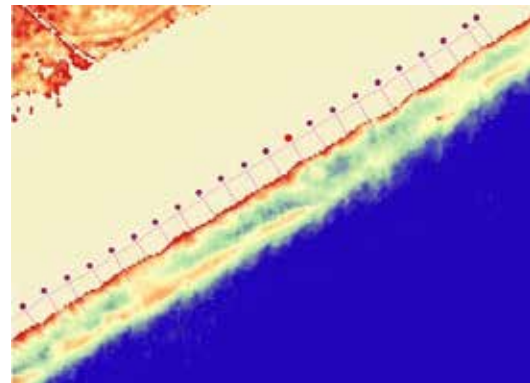


Fig. 7. Na imagem captada em 28 de Março de 2018 é perceptível o menor volume de areia submersa, em frente à praia.

## 6. IMAGENS ADQUIRIDAS POR UAV

Outra das zonas fortemente afectadas pela tempestade de Março de 2018 foi a Praia da Fuzeta (prolongamento Oeste da Ilha de Tavira), obrigando à antecipação de uma intervenção já programada para este ano. A necessidade de se realizar rapidamente um LH de toda a zona de intervenção obrigou a um estudo antecipado para perceber que tipo de embarcações se poderiam utilizar, quais os horários de trabalho mais favoráveis (alturas de maré) e quais as áreas prioritárias, tudo isto atendendo às alterações verificadas na bacia hidrográfica. A utilização de um



UAV de rotor com diâmetro de 335 mm equipado com uma câmara multiespectral MAPIR Survey3W e sistema de posicionamento GNSS permitiu adquirir um conjunto de imagens de uma zona de interesse, a partir das quais se gerou uma ortoimagem através de técnicas fotogramétricas (Fig. 8).

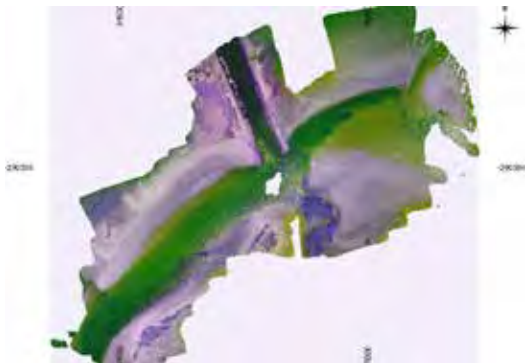


Fig. 8. Ortoimagem da Fuzeta (resolução espacial < 5cm).

A partir desta ortoimagem, e aplicando-se um conjunto de técnicas de processamento digital (separação das bandas azul, verde e infra-vermelho, conversão para reflectâncias, atenuação do brilho solar e calibração do modelo simples com profundidades reduzidas ao ZH) obteve-se um modelo batimétrico (Fig. 9) que permitiu, num curto espaço de tempo estudar a zona e gerir os meios e tarefas necessários à programação dos trabalhos.

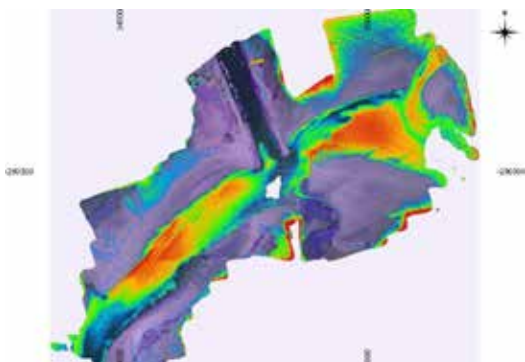


Fig. 9. Batimetria derivada de imagens multiespectrais adquiridas por UAV.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de uma metodologia simples para extracção de batimetria, baseada em técnicas de detecção remota testadas e demonstradas por diversos autores, tem permitido estimar a batimetria com bom grau de confiança (desvio padrão das diferenças verificadas entre modelos obtidos e profundidades precisas < 1 metro). Apesar do rigor não ser suficiente para o cálculo de volumes de trabalho realizado, as imagens multiespectrais adquiridas por satélite ou UAV são actualmente um recurso indispensável para a gestão de trabalhos hidrográficos e apoio à navegação no âmbito dos projectos das obras marítimas em curso.

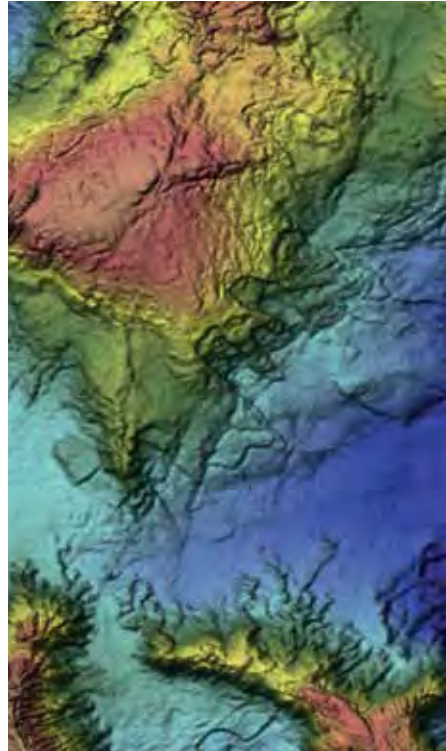
## REFERÊNCIAS

- Guerreiro, R. e Moura, A. (2016). A utilização de imagens de satélite multiespectrais de elevada resolução espacial para a derivação de batimetria. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica 2016*, Lisboa.
- Laporte, Jean, Hedley, John e Mouscardés, Pierre (2015). *Satellite Derived Bathymetry Migration*, Hydro International, Netherlands.
- Lillesand, Thomas e Kiefer, Ralph (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, New York.
- Pacheco, André, Horta, João, Loureiro, Carlos e Ferreira, Óscar (2014). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters, *Remote sensing of environment - Elsevier*, Amsterdam.
- Soares, Jorge (2016). *Reforço do cordão dunar da Ilha de Tavira/Praia do Barril – Projecto de execução*, Faro.

Nota: este documento não utiliza o novo acordo ortográfico.

# NAVEGAÇÃO

## 5<sup>as</sup>. JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA





# Avaliação de desempenho do Posicionamento Preciso Pontual com GNSS, em modo cinemático

A. Alves (1), J. Marreiros (2) e V. B. Mendes (3)

- (1) Instituto Hidrográfico (IH). vidigal.alves@hidrografico.pt & vidigal.alves@marinha.pt
- (2) Instituto Universitário Militar (IUM), Centro de Investigação Naval (CINAV).
- (3) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), Instituto Dom Luiz (IDL).

**Resumo:** O posicionamento preciso pontual (PPP) tem-se revelado um método de posicionamento GNSS alternativo aos métodos relativos com muito potencial e vários benefícios. Existem diversas aplicações informáticas, de *software* e de acesso *on-line*, para o processamento em modo PPP, cujo desempenho, em posicionamento cinemático, não é suficientemente conhecido. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho destas aplicações, tendo sido usados quatro conjuntos de dados: três trajetórias com a estação em movimento e uma estação estática.

O cálculo de uma trajetória de referência, em modo relativo, foi realizado com o *software* científico TRACK. O processamento em modo PPP, para avaliação do desempenho, foi realizado com o *software* RTKLIB e os serviços *on-line* de acesso livre (CSRS-PPP e Magic GNSS). As soluções PPP obtidas foram comparadas com as trajetórias de referência, tendo sido calculados estimadores estatísticos dos valores das diferenças que permitiram avaliar o seu desempenho para o RTKLIB, CSRS-PPP e Magic GNSS.

**Palavras-chave:** GNSS, Processamento, Posicionamento Cinemático, Posicionamento Preciso Pontual.

## 1. INTRODUÇÃO

O posicionamento GNSS – *Global Navigation Satellite Systems* - engloba diferentes metodologias utilizadas em modo estático ou cinemático e modo absoluto ou relativo. O Posicionamento Preciso Pontual (PPP) baseia-se na correção ou mitigação dos erros inerentes às observações, incluindo correções às órbitas e aos relógios dos satélites, usando produtos disponibilizados por diversas instituições, tais como, por exemplo, o *International GNSS Service* (IGS). O método PPP utiliza observações da fase e da pseudo-distância de um único recetor, em modo absoluto. Para além da utilização de órbitas e cronometria de precisão, a qualidade da solução depende também, entre outros fatores, da eficiente modelação de outras fontes de erro. A utilização de observações de dupla frequência permite eliminar o efeito de primeira ordem da ionosfera, sendo necessário ter em consideração o erro devido à componente neutra da atmosfera, erro devido à rotação das antenas dos satélites e dos receptores (*wind-up*), variação do centro de fase das antenas do receptor e do satélite e o efeito das marés terrestres (Kouba e Héroux, 2001). Além das vantagens associadas ao facto de necessitar de um único recetor, reduzindo custos e eventual trabalho de campo, as soluções PPP são estabelecidas num referencial global, o *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF), proporcionando consistência nas coordenadas, quando comparado com métodos de posicionamento relativo. Por outro lado, a resolução das ambiguidades é menos eficiente e o tempo de

convergência da solução é maior (Bisnath & Gao, 2009).

Existem atualmente diversos *software* e serviços PPP *on-line* de acesso livre, cujo desempenho no posicionamento de estações em movimento não é suficientemente conhecido e necessita de ser avaliado. Para tal foram utilizados dados GNSS obtidos em três percursos efetuados no Seixal (Base Hidrográfica da Azinheira) e dados de uma estação fixa em Cascais (CASC) da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP).

## 2. OS SOFTWARE E SERVIÇOS ON-LINE DE ACESSO LIVRE

Os dados foram processados por quatro aplicações informáticas, dois *software* (TRACK, RTKLIB) e dois serviços *on-line* PPP de acesso livre por *Internet* (CSRS-PPP, MagicGNSS). Os resultados obtidos pelo programa TRACK, em modo RTK (*Real Time Kinematic*), serviram de padrão para as trajetórias de referência. O TRACK foi desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), *Scripps Institution of Oceanography* e *Harvard University*, com o apoio da *National Science Foundation*. O RTKLIB foi desenvolvido pelo *Laboratory of Satellite Navigation*, na *Tokyo University of Marine Science and Technology*. O serviço de processamento *on-line* CSRS-PPP foi desenvolvido pelo NRCan-CGS (*Natural Resources Canada - Canadian Geodetic Service*). O serviço de processamento *on-line* Magic GNSS foi desenvolvido pelo segmento espacial da

multinacional GMV (*Innovating Solutions*), que também opera através da *Internet* nos moldes do serviço anterior.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Aquisição de dados

Os dados GNSS utilizados neste trabalho foram adquiridos no dia 19/09/2016, no concelho do Seixal, no interior e imediações da Base Hidrográfica da Azinheira (BHA). Dos três percursos realizados, em dois deles (BALD e ESTR) foi utilizado um quadriciclo motorizado. O outro percurso, CAIS, foi realizado em modo apeado. Para a aquisição de dados foi utilizada uma antena *Zephyr Model 2*, um recetor *Trimble R7* e um controlador *TSC3*. Os dados foram processados com as quatro ferramentas de processamento atrás referidas. Para o processamento no TRACK foram associados os dados, para o mesmo dia, da estação fixa CASC. Os dados desta estação foram ainda sujeitos a processamento em modo PPP-cinemático para avaliação de desempenho, por comparação com as suas coordenadas em ITRF2014 (Altamimi *et al.*, 2016).

#### 3.2. Parametrização do software

Os serviços *on-line* de processamento não permitem alterar a configuração dos parâmetros de processamento. Além da submissão dos ficheiros RINEX via *Internet* e a seleção de um conjunto muito reduzido de opções, tais como a escolha do modo de processamento, sistema de referência e tipo de órbitas e correções aos relógios, toda a restante dinâmica de processamento (incluindo a modelação dos erros) é feita pelo serviço sem intervenção do utilizador.

O programa RTKLIB, permite ao utilizador configurar um conjunto abrangente de parâmetros de processamento e seleção de modelos, que influenciam a qualidade da solução. No sentido de avaliar o efeito de algumas opções de modelação dos erros e otimizar a parametrização do RTKLIB, foram realizados diversos ensaios. Para tal, efetuou-se o processamento das observações para a estação CASC, dia 1 de abril de 2018, com observações a 30 s, simulando um comportamento dinâmico. As coordenadas publicadas de CASC em ITRF2014 foram atualizadas para a época. A avaliação das diferentes opções de processamento foi feita por análise da média e desvio padrão das diferenças entre as coordenadas RTKLIB e a solução de referência. Foram utilizados ficheiros de órbitas (SP3) correções aos relógios dos satélites (CLK), parâmetros de rotação da Terra (ERP) e variação dos centros de fase das antenas do recetor e satélites; (ATX) disponibilizados pelo IGS (produtos finais), enviesamentos diferenciais (P1-P2) de código (DCB) determinados pelo *Center for Orbit*

*Determination in Europe* (CODE) e modelo de carga oceânica determinado pelo *Onsala Space Observatory* (<http://holt.oso.chalmers.se/loading>). Em todos os testes, optou-se por uma solução flutuante, uma vez que a resolução das ambiguidades é uma funcionalidade experimental RTKLIB.

Os testes realizados confirmaram a importância das correções atmosféricas (ionosfera e troposfera), pelo que a utilização da combinação linear livre da ionosfera (Lc) e a estimação do atraso troposférico é essencial. O IGS disponibiliza correções aos relógios com intervalos de 5 min e 30 s. A utilização das correções com 5 min degrada significativamente as soluções, com desvios padrão das diferenças para as 3 componentes ( $\varphi$ ,  $\lambda$  e  $h$ ) superiores entre 1.6 ( $\lambda$ ) e 1.9 ( $\varphi$  e  $h$ ) em relação aos obtidos com utilização de correções a 30 s. A correção de carga oceânica melhora apenas ligeiramente a solução, sendo a correção da maré terrestre bastante mais importante, para esta estação. A correção dos centros de fase das antenas também conduz apenas a uma melhoria ligeira da solução. O efeito de *wind-up* também é mínimo, sendo este facto relevante, uma vez que num contexto de posicionamento cinemático a correção de *wind-up* é de difícil aplicação, devido a uma rotação constante da antena. A avaliação do desempenho do RTKLIB para trajetos cinemáticos será consequentemente feita sem correção de *wind-up*. O processamento do RTKLIB recorre à utilização de um filtro de Kalman, que permite 3 variantes: progressivo (*forward*), regressivo (*backward*) e combinado (*combined*). A utilização do filtro em modo *combined* justifica-se, uma vez que elimina o efeito indesejado correspondente ao período de convergência da solução. Se considerarmos que a solução converge quando o MRSE (*Mean Radial Spherical Error*) for inferior a 10 cm, para o caso em análise, esta convergência só é atingida ao fim de 45 min. Devido a este facto, a solução em modo *forward* conduz a valores de desvios padrão das diferenças ( $\varphi$ ,  $\lambda$  e  $h$ ) de 0.030 m, 0.027 m e 0.056 m, superiores aos obtidos em modo *combined*: 0.017 m, 0.021 m e 0.033 m, respectivamente. Para além dos desvios padrão das diferenças, há também que ter em consideração os enviesamentos relativamente aos valores de referência. Para a solução em modo *combined* (e que será adotada na análise seguinte), os enviesamentos obtidos são 0.007 m, 0.001 m e 0.036 m.

Este ensaio permitiu determinar a melhor configuração para o processamento PPP-cinemático com o RTKLIB e concluir que é possível obter, com uma adequada parametrização do RTKLIB, resultados com incertezas de ordem centimétrica, com eventual degradação em condições de posicionamento dinâmico, que serão analisados na secção seguinte.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados baseou-se na comparação das diferenças de coordenadas de posições calculadas pelo TRACK, RTKLIB, CSRS-PPP e Magic GNSS, para as trajetórias com a estação em movimento BALD, ESTR e CAIS.

##### 4.1. Estação BALD



Fig. 1. Trajetória obtida pelo software RTKLIB para o percurso BALD.

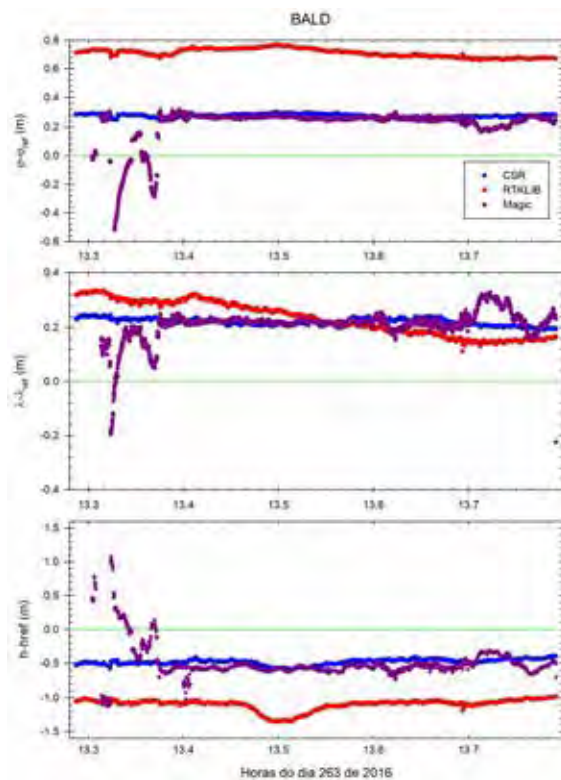


Fig. 2. BALD - Diferenças nas soluções RTKLIB/CSRS-PPP/MagicGNSS e TRACK, componente horizontal e vertical.

Esta estação cinemática foi realizada numa área de baldio delimitada a norte pelo rio Coina, a sul pela Avenida Mud Juvenil, a leste pela BHA e a oeste pela referida avenida e pelo parque de estacionamento do terminal fluvial do Seixal (Fig. 1). A duração da sessão de observação foi de cerca de 30 min. Os principais problemas nas soluções (Fig. 2) apresentam-se ao nível da convergência e do resultado do processamento do serviço MagicGNSS,

nos primeiros 5 a 6 min. O resultado obtido pelo RTKLIB tem um enviesamento elevado em relação ao padrão TRACK, chegando a ser superior a 0.7 m em latitude e superior a 1 m na componente vertical. No geral, o RTKLIB apresenta um maior enviesamento e o CSRS-PPP apresenta resultados mais próximos do padrão com um comportamento de solução mais estável.

##### 4.2. Estação ESTR

A estação *ESTR* percorreu a principal estrada interior da BHA prosseguindo depois para o exterior da base percorrendo a zona de praia adjacente banhada pelo rio Coina. Voltou depois a entrar na base e terminou a aquisição de dados no seu interior. A sessão durou cerca de 28 min.

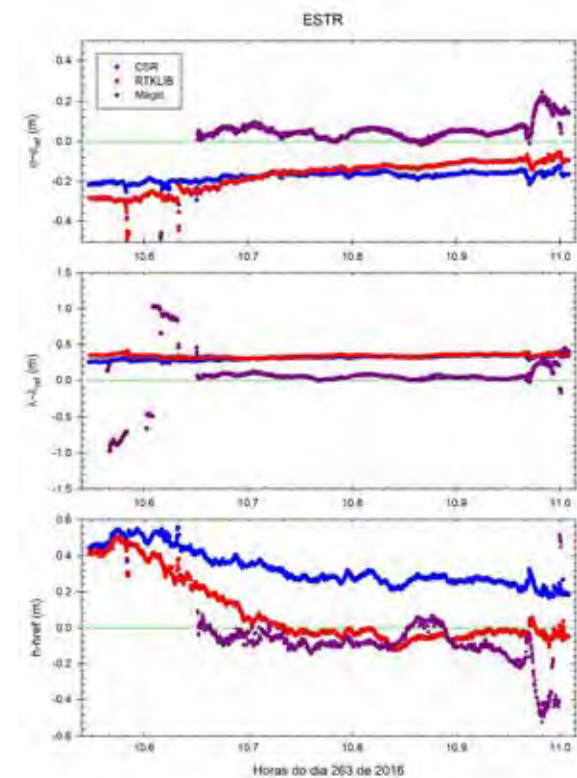


Fig. 3. ESTR - Diferenças nas soluções RTKLIB/CSRS-PPP/MagicGNSS e TRACK, componente horizontal e vertical

A convergência inicial apresenta-se novamente como o principal problema, sendo visível sobretudo nos primeiros 6 min (Fig. 3).

Neste período, foram obtidas soluções muito afastadas do padrão e observou-se, nalguns casos, uma total ausência de soluções. Numa análise às soluções pós convergência inicial, o MagicGNSS apresenta menos enviesamento nas componentes latitude e longitude e uma prestação algo semelhante à obtida pelo RTKLIB na componente vertical. Apesar disso este serviço apresenta uma dispersão das diferenças superior às outras duas ferramentas. O CSRS-PPP e o RTKLIB apresentam soluções muito semelhantes em latitude e longitude. Na componente vertical o RTKLIB obteve a melhor solução.

### 4.3. Estação CAIS

Esta estação percorreu o cais das embarcações da BHA. O levantamento durou cerca de 15 min. No que respeita à componente horizontal  $\varphi$ , a solução do MagicGNSS apresenta menor enviesamento entre os 2 e 10 min (Fig. 4). Contudo, apresenta também uma maior dispersão dessas diferenças. Na componente longitude e na componente vertical, a solução CSRS-PPP apresenta menor enviesamento e menor dispersão. A solução RTKLIB apresenta um perfil que se aproxima da solução CSRS, com um enviesamento em cerca dos 20 cm na componente vertical e em longitude.

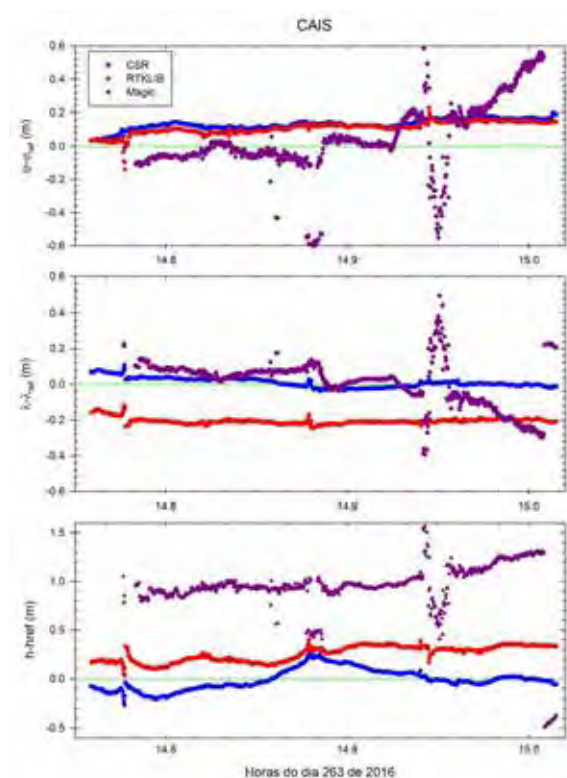


Fig. 4. CAIS - Diferenças nas soluções RTKLIB/CSRS-PPP/MagicGNSS e TRACK, componente horizontal e vertical

## 5. CONCLUSÕES

Todas as soluções evidenciaram enviesamento da ordem submétrica, relativamente à trajetória RTK de referência. Este enviesamento depende do *software* e pode estar associado ao período relativamente curto de dados das estações cinemáticas, que não excedeu 30 min e não terá sido suficiente para a solução PPP convergir.

O *software* CSRS-PPP foi o que evidenciou melhor desempenho, tendo um desvio padrão das diferenças com menor valor, da ordem decimétrica. De seguida, o RTKLIB, com uma ligeira degradação no desempenho relativamente ao CSRS-PPP. Com o

pior desempenho, destaca-se o Magic GNSS, cujos resultados são de qualidade significativamente inferior.

### Agradecimentos

Aos sargentos Leitão Gouveia e Santos Amaral pela colaboração e dedicação no apoio à recolha de dados.

### REFERÊNCIAS

- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109–6131.
- Bisnath, S., & Gao, Y. (2009). Precise point positioning: a powerful technique with a promising future. *GPS World*, 20(4), pp. 43-50.
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, pp. 12-28.

## A derivação de batimetria por satélite no apoio à decisão - Aplicação ao planeamento das operações do N.R.P. Rio Minho

(1) R. Guerreiro, (2) J. Catalão, (1) I. Bué.

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, n.º 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. [xavier.guerreiro@hidrografico.pt](mailto:xavier.guerreiro@hidrografico.pt)

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal.

**Resumo:** As técnicas de derivação de batimetria a partir de imagens de satélite são hoje tema recorrente de estudo, na procura de respostas à crescente necessidade de disponibilização de informação hidrográfica. Nesse contexto, e por se enquadrar na sua missão enquanto serviço hidrográfico nacional e, simultaneamente, órgão da Marinha e Laboratório do Estado para as ciências e técnicas do mar, estas técnicas são objeto de investigação no Instituto Hidrográfico.

Neste estudo demonstra-se que, aplicando um método empírico de derivação da batimetria a imagens multiespectrais da constelação de satélites Sentinel-2, o modelo batimétrico resultante não cumpre os requisitos da Organização Hidrográfica Internacional para os Levantamentos Hidrográficos, o que afasta o seu emprego na produção de documentos náuticos oficiais. Não obstante, e dadas as potencialidades do método de derivação desenvolvido, é apresentada uma proposta de aplicação desses modelos num produto de apoio à decisão para operações de patrulha.

**Palavras-chave:** Hidrografia, Navegação, Imagens Multiespectrais, Deteção Remota, Derivação de Batimetria.

### 1. INTRODUÇÃO

Conforme redação do Decreto-Lei n.º 230/2015 de 12 de outubro, o Instituto Hidrográfico (IH), enquanto órgão da Marinha Portuguesa e Laboratório do Estado, tem por missão fundamental, assegurar as atividades de investigação e desenvolvimento tecnológico relacionadas com as ciências do mar, com a sua aplicação prioritária em operações militares navais, designadamente nas áreas da hidrografia, da cartografia hidrográfica, da segurança da navegação, da oceanografia e da defesa do meio marinho.

Assim, o IH tem vindo a acompanhar o desenvolvimento de técnicas alternativas aos tradicionais Levantamentos Hidrográficos (LHs), executados com recurso a sistemas sondadores acústicos, como solução para aumentar a cobertura de informação batimétrica dos oceanos, mares e vias navegáveis. Dessas técnicas destaca-se a Derivação de Batimetria através de Imagens de Satélite, ou *Satellite Derived Bathymetry* (SDB), cujo desenvolvimento tem sido incentivado pela própria Organização Hidrográfica Internacional (OHI)

Com efeito, a SDB permite cobrir áreas extensas num curto intervalo de tempo e com baixos custos operacionais. Contudo, no caso particular das técnicas de derivação que têm por base imagens de satélite multiespectrais, a sua aplicabilidade é restrita a águas pouco profundas, pouca turbidas e com baixas concentrações de matéria particulada em suspensão. A estas limitações acrescem ainda a cobertura de nuvens e os efeitos dispersivos da atmosfera. Como tal, os modelos SDB apresentam

um desempenho inferior, quando comparados com modelos resultantes de LHs executados com recurso a sondadores acústicos (Guerreiro e Moura, 2016; Moura *et al.*, 2016), sendo difícil a sua aplicabilidade na produção de documentos náuticos oficiais. Por outro lado, não obstante os LHs “tradicionais” serem capazes de fornecer medições muito precisas e exatas, a sua execução tende a ter custos elevados e a demorar longos períodos de tempo, o que limita a cobertura geográfica realizada.

Com a experiência e conhecimento adquiridos na temática da SDB, conseguidos através de estudos e projetos, foi possível desenvolver no IH uma metodologia SDB cujo desempenho estatístico tem vindo a ser avaliado. A par desses estudos, quer-se agora com este trabalho, demonstrar o potencial de utilização da SDB enquanto fonte de informação para produtos especiais e sistemas de apoio à decisão na atividade operacional da Marinha e da Autoridade Marítima Nacional (AMN), tirando partido das vantagens da SDB já enunciadas. O emprego da SDB nestas aplicações pode ser menos restritivo quanto aos requisitos estatísticos dos modelos SDB, em comparação com a produção de documentos náuticos oficiais, visto que a desatualização, desadequação da informação batimétrica, ou até mesmo a sua inexistência, devem ser considerados na tomada de decisão em ambiente operacional. Em concreto, neste estudo utiliza-se uma metodologia SDB na construção de Diagramas de Impacto de Missão / *Mission Impact Diagrams* (MIDs), para avaliação do risco de encalhe do N.R.P. “Rio Minho”. Esta lancha de fiscalização foi projetada e especialmente concebida para missões de



patrulha em águas pouco profundas, e a sua área de atuação tem sido desde o seu aumento ao efetivo o Troço Internacional do Rio Minho (TIRM).

## 2. DADOS UTILIZADOS

### 2.1. Imagens multiespectrais da missão Sentinel-2

A missão Sentinel-2 é um programa espacial europeu de aquisição de imagens multiespectrais, com grande resolução espacial e radiométrica, faixa larga de aquisição e período de revisita curto. É composta pela constelação de satélites, Sentinel-2A e Sentinel-2B, que garante um ciclo de revisita com frequência de 5 dias no equador, aumentando para 10 dias com apenas um dos satélites operacional.

As imagens da missão Sentinel-2 têm vindo a ser utilizadas no IH, em estudos relativos à SDB, com resultados muito satisfatórios (Guerreiro e Moura, 2016; Moura *et al.*, 2016), pelo que neste trabalho se optou pela sua utilização.

Considerando como área de interesse o estuário e foz do rio Minho, onde o N.R.P. “Rio Minho” opera, foi possível identificar uma série de quatro imagens do satélite Sentinel-2A, com curto espaço temporal entre datas de aquisição, e condições meteorológicas ideais para a SDB, isto é, fraca agitação marítima e a ausência de nuvens. As quatro imagens encontram-se enumeradas na Tabela I.

Tabela I – Imagens Sentinel-2 utilizadas no estudo.

Data e Hora de aquisição (UTC)	Cobertura de Nuvens	Granule do Mosaico
2016/06/29 - 11h27m37s	9.65 %	29TNG
2016/07/09 - 11h24m03s	0.00 %	
2016/07/19 - 11h29m42s	0.00 %	
2016/07/29 - 11h24m07s	0.02 %	

Na Tabela II apresentam-se as principais características das bandas multiespectrais das imagens Sentinel-2 com maior interesse para a metodologia SDB aplicada.

Tabela II – Características das bandas multiespectrais do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (NIR) das imagens Sentinel-2. A resolução espectral é apresentada como “centro da banda (largura da banda)”.

Banda	Resolução Espectral (nm)	Resolução Espacial (m)	Relação Sinal Ruído
B2 - Blue	490 (65)	10	154
B3 - Green	560 (35)		168
B4 - Red	665 (30)		142
B8 - NIR	842 (115)		172

### 2.2. Informação batimétrica em arquivo

A metodologia SDB desenvolvida no IH tem por base a solução empírica apresentada por Stumpf *et al.* (2003), que requer dados *in situ* para calibração

do algoritmo. Quer-se ainda determinar parâmetros estatísticos de modo a verificar a robustez do modelo SDB resultante da metodologia aplicada, comparando-o com os requisitos mínimos para as Ordens dos LHs, apresentados na publicação S-44 da IHO (International Hydrographic Organization, 2008). Após consulta do arquivo de dados batimétricos do IH, identificaram-se dois LHs, um com recurso a Sondador Multifeixe (SMF) que cumpre a Ordem 1a, e outro a Sondador de Feixe Simples (SFS) que cumpre a Ordem 1b, realizados no estuário e foz do rio Minho de 26 de junho a 8 julho de 2016. Os dados do LH a SMF utilizaram-se para a determinação da robustez estatística do modelo SDB. Do LH a SFS foram utilizadas 625 sondas para calibração da solução empírica.

## 3. METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO

### 3.1. Processamento dos Modelos Batimétricos SDB

A solução empírica proposta por Stumpf *et al.* (2003) resulta do rácio dos logaritmos naturais das reflectâncias de duas bandas espectrais,  $R_w(\lambda_j)$  e  $R_w(\lambda_i)$ , conforme a expressão que se segue:

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0$$

A constante  $n$  é aplicada de modo a garantir que os logaritmos naturais são sempre positivos e que o rácio produz uma resposta linear com a profundidade. As constantes  $m_1$  e  $m_0$  calibram o algoritmo, servindo  $m_1$  para criar uma relação entre o rácio das reflectâncias e os valores de profundidade *in situ*, e  $m_0$  para determinar o desvio relativamente à profundidade dos 0 m. Estas constantes obtêm-se da reta de regressão:

$$y = m_1 x + m_0$$

No processamento realizado utilizaram-se as reflectâncias das bandas B2 (azul) e B3 (verde), que correspondem ao intervalo de comprimentos de onda em que a radiação solar sofre menos dispersão e absorção, na água pura do mar, conforme demonstra a Figura 1 (Mobley, 1994).

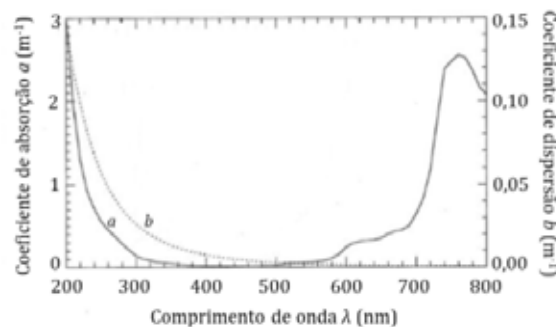


Fig. 1. Coeficientes de absorção (linha a cheio, a) e dispersão (linha a pontado, b) para a água pura do mar, conforme comprimento de onda da radiação eletromagnética

A Figura 2 apresenta de forma resumida o fluxo de processamento dos modelos SDB e a determinação dos parâmetros estatísticos por comparação com o modelo batimétrico de referência.



Fig. 2. Fluxo de processamento dos modelos SDB e respetiva estatística.

Considerando o objetivo proposto para este trabalho, optou-se por não aplicar correções atmosféricas às imagens Sentinel-2, utilizando-se as reflectâncias no topo da atmosfera ( $R_{TOA}$ ). A separação das componentes marítima e terrestre é conseguida através do cálculo do *Normalized Difference Water Index*. Para corrigir o efeito do brilho solar nas  $R_{TOA}$  das bandas B2 e B3 optou-se pela solução de Hedley *et al.* (2005), baseada na regressão linear entre uma banda NIR e as bandas do visível a corrigir.

### 3.2. Elaboração dos MIDs de risco de encalhe

Para elaboração dos MIDs é proposto um modelo de cálculo que toma em consideração os seguintes fatores: o modelo SDB, o desvio padrão da superfície de diferenças entre o modelo SDB e o modelo de referência, as previsões de altura de maré e as características do navio para os quais os MIDs são calculados. Assim, a expressão de cálculo proposta para os MIDs é dada por:

$$H_{disp} = Z_{SDB} - \sigma_{SDB} - C_{navio} + H_{maré}$$

O desvio padrão ( $\sigma_{SDB}$ ) apenas é considerado no sentido de diminuir a altura da coluna de água disponível ( $H_{disp}$ ) ao modelo batimétrico SDB ( $Z_{SDB}$ ). O calado do navio ( $C_{navio}$ ) é subtraído à  $H_{disp}$ , assumindo-se que, para o caso do N.R.P. “Rio Minho” o valor é de 0.77 m. Para a previsão horária da altura de maré ( $H_{maré}$ ) tomou-se como referência o porto de Viana do Castelo. São então criadas três classes de risco de encalhe:

- Risco Mínimo, quando  $H_{disp} > 2C_{navio}$ ;
- Riscos Moderado, quando  $H_{disp} > C_{navio}$  e  $H_{disp} < 2C_{navio}$ ;
- Risco Elevado, quando  $H_{disp} < C_{navio}$ .

## 4. RESULTADOS

Dos modelos SDB processados conclui-se que foi o obtido a partir da imagem de 2016/06/29 que apresentou melhores indicadores estatísticos, pelo que foi tomado como  $Z_{SDB}$  para cálculo dos MIDs. Os indicadores estatísticos são apresentados na

Tabela III, enquanto que na Figura 3 é apresentado um recorte do modelo SDB para a área de interesse.

Tabela III – Estatística das diferenças calculadas entre os modelos SDB processados e o modelo batimétrico de referência (LH a SMF). O máximo, o mínimo, a média ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) são dados em metros e  $n$  representa o número de ocorrências consideradas para os cálculos.

Modelo SDB	Máx.	Min.	$\bar{x}$	$\sigma$	$n$
2016/06/29	-8.0	7.3	0.1	1.5	17338
2016/07/09	-10.8	8.7	-0.8	2.1	17335
2016/07/19	-12.2	10	-0.2	2.9	17306
2016/07/29	-10.7	8.4	-0.9	1.8	17329

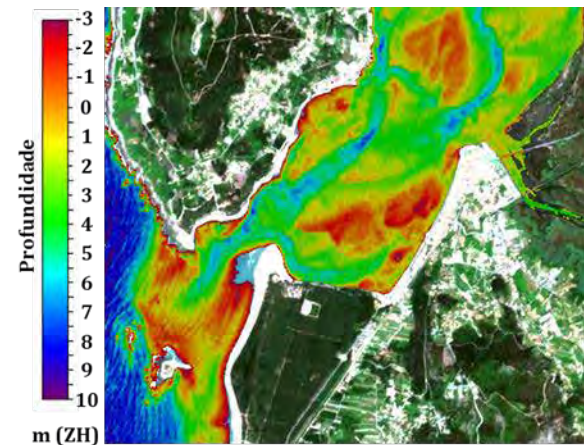


Fig. 3. Modelo SDB derivado da imagem de 29/06/2016.

A Ordem 1b tem como o requisito mínimo para a incerteza horizontal total (THU), 5 m mais 5% do valor de profundidade a 95% de confiança. Já para a Ordem 2 o mesmo requisito é mais permissivo, tendo como máximo admissível 20 m mais 10% do valor da profundidade, a 95% de confiança (International Hydrographic Organization, 2008). As imagens de os modelos SDB derivaram, têm uma exatidão posicional de 10.28 m a 95.5% de confiança (European Space Agency, 2017). Considerando que a barra e estuário do rio Minho rondam os 10 m de profundidade, pode concluir-se que, relativamente à THU, é cumprida a Ordem 2 mas a Ordem 1b não.

A incerteza vertical total (TVU) é obtida a partir da seguinte expressão:

$$TVU = \pm \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$$

onde  $a$  representa a porção de incerteza que não varia de acordo com a profundidade,  $b$  é o coeficiente que representa a porção de incerteza que varia de acordo com a profundidade e  $d$  é a profundidade. Para a Ordem 1b e Ordem 2,  $a$  e  $b$  tomam os valores apresentados na Tabela IV.

Tabela IV – Valores de  $a$  e  $b$  a aplicar no cálculo da TVU.

	Ordem 1b	Ordem 2
$a$	0.5 m	1.0 m
$b$	0.013 m	0.023 m

Tomando-se como profundidade de referência na área de estudo os 10 m, e os valores de  $a$  e  $b$  da Tabela IV, obtém-se para a Ordem 1b, uma TVU máxima admissível de  $\pm 0.52$  m e para a Ordem 2 uma TVU máxima admissível de  $\pm 1.03$  m. A partir da superfície de diferenças entre o modelo SDB obtido da imagem de 2016/06/29 e o modelo de referência, e considerando os valores máximos admissíveis para a TVU, determinou-se que das 17338 diferenças calculadas apenas 33% (5771) cumpriram a Ordem b e 61% (10504) cumpriram a Ordem 2, percentagens aquém dos 95% necessários.

Afastada a hipótese de utilizar o modelo SDB avaliado, na produção de documentos náuticos oficiais, efetuou-se o cálculo dos MIDs, conforme a expressão atrás proposta, e considerando as previsões horárias das alturas de maré ao longo do dia 2017/11/07 (Antunes, 2011).

Obtiveram-se assim 24 MIDs para o risco de encalhe do N.R.P. “Rio Minho”, apresentando-se na Figura 4 os obtidos para as 14:00 UTC em situação de baixa-mar, e para as 20:00 UTC em situação de preia-mar.

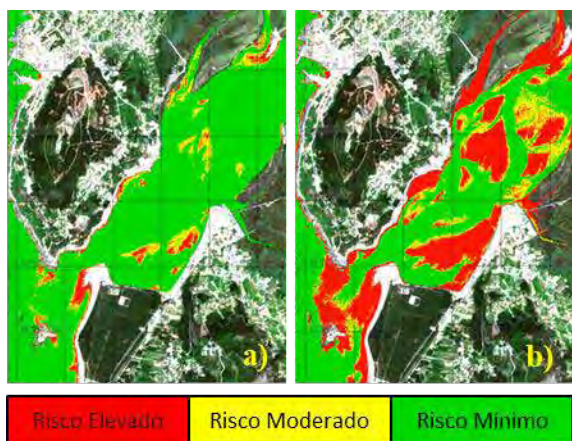


Fig. 4. MID para o risco de encalhe do N.R.P. “Rio Minho” no estuário e foz do Rio Minho, às 14:00 UTC (a) e 20:00 UTC (b) de 2017/11/07.

A Figura 4 demonstra as potencialidades dos MIDs criados com recurso a técnicas SDB, no apoio à atividade operacional da Marinha e AMN. Existindo ainda zonas do mar territorial português e zonas em águas interiores, bem como outras áreas costeiras de interesse nacional onde a informação batimétrica é insuficiente, desatualizada ou inexistente, fica comprovado que as técnicas SDB podem ser parte da solução, no apoio à tomada de decisão, em particular nas missões de patrulha em águas restritas ou zonas costeiras pouco profundas.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo demonstrou-se que o modelo SDB derivado da imagem Sentinel-2A de 2016/06/29 não cumpriu os requisitos da IHO para os LHs, o que compromete a sua utilização na produção de

documentos náuticos oficiais. Contudo, partindo desse modelo, da sua avaliação estatística, considerando as previsões horárias da altura de maré para a área modelada e as características do calado do N.R.P. “Rio Minho”, foram propostos MIDs de risco de encalhe desse navio. Considera-se assim que o resultado final tem interesse para a atividade operacional, em particular no que respeita ao apoio de tomada de decisão, esperando-se que este estudo possa contribuir para o desenvolvimento das técnicas SDB enquanto fonte de informação para produtos especiais de apoio à Marinha e AMN.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à União Europeia (EU) a disponibilização de imagens Sentinel-2 no âmbito do programa Copernicus.

## REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2011). Monitoring sea level change at Cascais tide gauge. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 870-874, 2011.
- European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 Mission Performance Centre - Data Quality Report*. (Issue 17).
- Guerreiro, R., e Moura A. (2015) Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Lisboa.
- Guerreiro, R., e Moura, A. (2016). A utilização de imagens de satélite multiespectrais de elevada resolução espacial para a derivação de batimetria. *Actas das 4.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 41-44.
- Hedley, J.D., Harborne, A.R., and Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 10, 2107 – 2112.
- International Hydrographic Organization. (2008). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (5th ed.). Monaco.
- Mobley, C.D. (1994). *Light and Water – Radiative transfer in Natural Waters*. Academic Press. 592 PP.
- Moura, A., Guerreiro, R., e Monteiro, C. (2016). As Potencialidades da Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite Multiespectrais na produção de Cartografia Náutica. *Actas das 4.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 52-55.
- Stumpf, R.P., Holdereid, M., and Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol. 48, No. 1, Part 2, 547-55.

# Effect of speed and depth variation on the interaction between two ships

Francisco Pedro (1), João A. Santos (2,3), Liliana V. Pinheiro (1), Conceição J.E.M. Fortes (1)  
Miguel Hinostroza (3)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *fpedro@lnec.pt ; lpinheiro@lnec.pt ; jfortes@lnec.pt*

(2) ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Rua do Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007, Lisboa, Portugal. *jasantos@dec.isel.ipl.pt*

(3) CENTEC – Centre for Marine Technology and Ocean Engineering, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal. *miguel.hinostroza@centec.tecnico.ulisboa.pt*

**Abstract:** This paper analyses the influence of water depth and speed variation in the hydrodynamic interaction between a navigating ship and a stationary one, using physical and numerical modelling. The passing ship is a self-propelled scale model of the “Aurora” chemical tanker whereas the stationary ship is a scale model of the “Esso Osaka” oil tanker. The tests were carried out for several values of the “Aurora” advance velocity and for different water levels. An analysis on the wake wave characteristics and roll motion is made, as function of the water depth and velocity values is made. The experimental roll motion was compared with results from the numerical package SWAMS, which simulates the movements of a ship (moored or free-floating) un-der different wave actions. The time series of the “Aurora” wake waves were used to define the incident waves in the SWAMS package.

**Key words:** Wake waves, Physical model, Numerical model, Ship interaction, Ship motion

## 1. INTRODUCTION

To improve the numerical package SWAMS (Pinheiro *et al.*, 2013) so that it can simulate the interaction of ship wake waves with an otherwise motionless ship, several scale model tests were carried out at one of the wave tanks of the Portuguese Civil Engineering Laboratory (LNEC).

In these tests the wake waves generated by a self-propelled scale of the chemical tanker “Aurora” moving at a constant speed are characterized as well as the motions they induce in a scale model of the tanker “Esso Osaka”. The tests were carried out for several values of the “Aurora” advance velocity and for different water depths.

After this introduction, a description of the scale model tests and the numerical model SWAMS are presented. Then, experimental results are presented, namely, the velocity of Aurora which is calculated by two approaches (laser scan and wave gauge measurements). It is also determined the wake wave characteristic (height and frequency) and the roll amplitude of the “Esso Osaka”. Those values are plotted as function of the Aurora velocity. Finally, comparison between experimental and numerical results, in terms of roll RAO’s, are presented in order to assess the capabilities of the numerical models.

## 2. SCALE MODEL TESTS

A wave tank 23 m long and 22 m wide, Figure 1, of the Maritime Hydraulics Testing Hall of the Port and Maritime Structures division of LNEC, was used in the tests. In addition to the “Aurora” and “Esso Osaka” scale models, the equipment used in the tests included 7 resistive wave probes to measure the free surface elevation, one gyroscope to measure the movements of the Esso Osaka ship, one laser scan to measure the passing distance of the ship and one video camera to film the tests, Figure 1. The laser scan measurements allow also the estimation of the passing ship’s velocity.

The “Esso Osaka” is a scale model at 1:100 of the hull of the homonym tanker. Its total length is 3.45 m, its beam is 0.54 m and its maximum draft is 0.23 m.

The “Aurora” is a self-propelled model. Its engine, rudder and gyroscope enable its navigation along a selected heading with a given advance speed. It is a scale model at 1:65.7 of the hull of the homonym chemical tanker. Its total length is 2.59 m, its beam is 0.43 m and its maximum draft is 0.11 m.

The “Aurora” model ship made voyages along the smallest side of the tank with different velocities at an intended distance to the “Esso Osaka” of 0.59 m (this is the distance between the ship sides, 1.07 m between the ships longitudinal axes).

Table 1. Experimental results for the three water depths and three velocities

Water Depth (m)	Engine Power %	Passing ship's velocity			Wake wave		Osaka's response oscillation
		V measured w/ probes (m/s)	V measured w/ laser (m/s)	$F_h = \frac{V}{\sqrt{gh}}$	Height (m)	Freq. (Hz)	Roll amplitude (deg)
0.82	90	0.661	0.984	0.347	0.0097	1.943	0.0044
	80	0.467	0.765	0.270	0.0073	2.499	0.0087
	70	0.506	0.690	0.243	0.0041	2.772	0.0058
0.34	90	0.826	0.862	0.472	0.0095	2.218	0.0012
	80	0.905	0.768	0.420	0.0081	2.491	0.0016
	70	0.599	0.690	0.378	0.0030	2.772	0.0010
0.255	90	0.882	0.865	0.547	0.0105	2.210	0.0038
	80	0.808	-	0.511	0.0052	2.366	0.0017
	70	0.655	-	0.511	0.3738	2.366	0.1100
	90	0.849	0.768	0.485	0.0093	2.491	0.0022

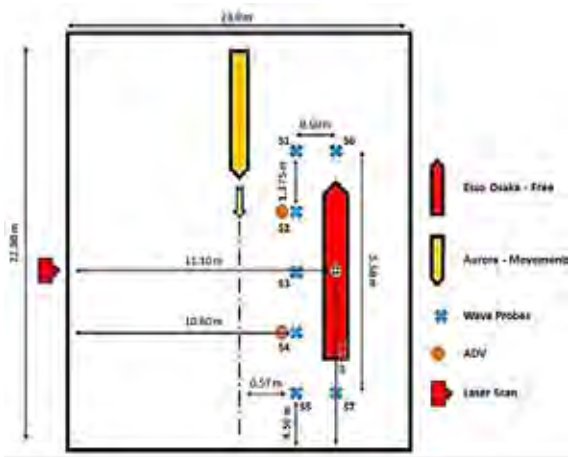


Figure 1. Physical model and equipment set-up

Each test consisted of the following steps: a) Adjust the water level in the tank; b) Placing of blocks, weights and equipment on each ship (including the gyroscope at the Esso Osaka ship); c) Connection and/or placement of equipment for measuring free surface elevation, as well as the laser scan; d) Calibration of resistive probes; e) Voyage of the "Aurora" ship along the linear path with a pre-set engine power; f) Acquisition and storing of the different type of measurements.

Nine different conditions were considered, three values for the engine power (90%, 80% and 70% of the maximum engine power) and three values for the water depth (0.820 m, 0.345 m and 0.255 m). For each test condition up to 10 repetitions were carried out. A total of 48 tests were carried out.

### 3 NUMERICAL PACKAGE SWAMS

The SWAMS numerical package, Pinheiro *et al.* (2013), consists of a set of numerical models to study the wave propagation and interaction with moored ships. It couples numerical models for sea-wave

propagation and for moored ship behavior, thus enabling the identification of dangerous sea states and/or resonance problems.

For the simulation of the behavior of moored ships, the SWAMS package uses the numerical package MOORNAV (Santos, 1994), which uses the results obtained in the frequency domain with the numerical model WAMIT (Korsemeier *et al.*, 1988) for the radiation problems and of diffraction of a free ship. These results are passed to the time domain and used by the BAS model (Mynett *et al.*, 1985) in the assembly and resolution of the equations of movement of the moored vessel, taking into account the incident agitation, as well as the geometry and the constitutive relations of the elements of the mooring system.

The results of this numerical model are the time-series of the motions along each of the generalized coordinates and of the forces in the mooring system elements. The key data for this model is the time series of the external forces. Should one have this time series for the ship-wake waves then it would be possible to get the motions of the moored (or of the free-floating) ship subjected to these waves.

## 4 RESULTS and DISCUSSION

### 4.1 Experimental results

To evaluate the velocity of the "Aurora" in each test, two approaches were used: a) laser scan measurements; b) free surface elevation at five different wave gauges. The first approach consists in dividing the ship's length by the time it takes to pass in front of the laser scan. The second approach consists in identifying the passage of the wake wave at each of the wave gauges and dividing the distance travelled by its crest per unit time. The wake wave averaged velocity in Table 1 ("wave" in Figure 2) corresponds to the average of the 4 values that can be estimated from the 5 consecutive wave gauges.

In general, the results from both approaches are similar, except for the deepest water depth, where velocities estimated from laser scan measurements are higher than the ones estimated from the wave gages. As expected, the velocity increases as the engine power increases.

To estimate the wake wave height,  $H$ , Table 1, the crest-trough difference measured in each wave gauge is averaged. But the passing ship did not always follow the desired path. Consequently the distance from the ship varies in each test. According to Verhey and Bogaerts (1989) the wake wave height decreases with the distance from the ship:

$$H(x) = h \left( \frac{x}{h} \right)^{-0.33} F_h^4 \quad (1)$$

where  $x$  is the distance from the ship's side,  $h$  is the depth and  $F_h^4$  is the ship's Froude number. Therefore, in Figure 3, a relative wave height ( $H/x^{-0.33}$ ) is presented for better visualization of the trend. As expected the relative wake wave height values increase with the ship's speed.

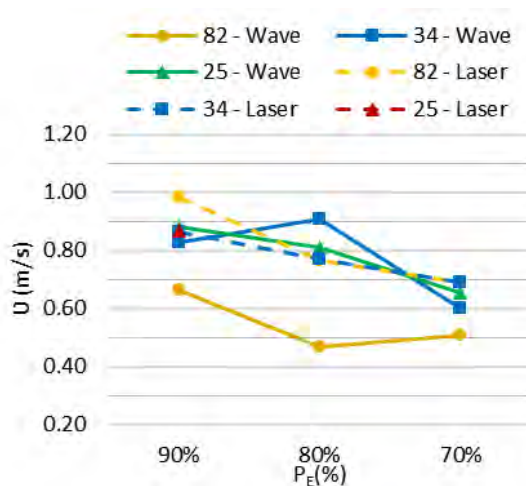


Figure 2. Velocity estimation from probes and from laser measurements

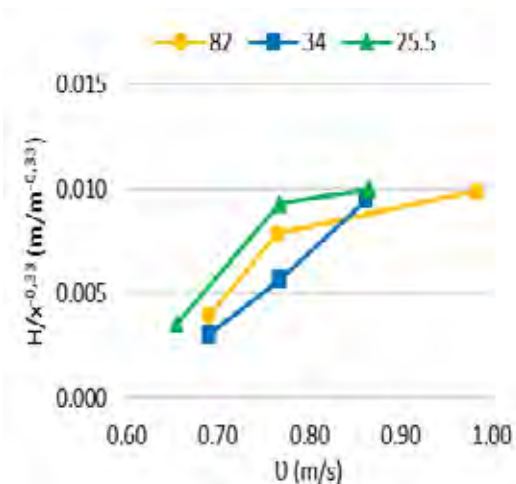


Figure 3. Relative wake wave height

Figure 4 presents the relative amplitude of the roll motion of the “Esso Osaka” model, for the several values of water depth and of the “Aurora” velocity. As the passing ship's velocity decreases, so does the stationary ship's response.

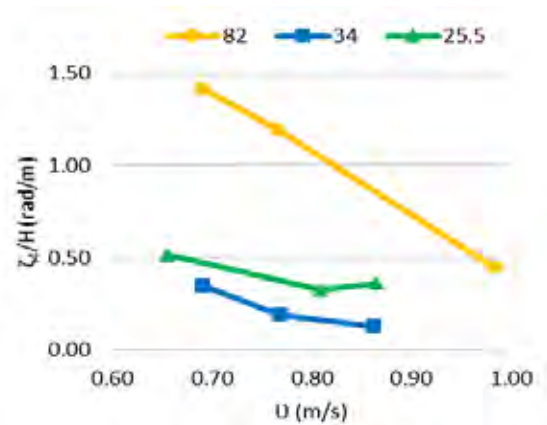


Figure 4. Relative amplitude of the roll motion.

#### 4.2 Physical and numerical results comparison

The numerical simulations were carried out with the WAMIT model for frequencies between 0.2 Hz and 18.0 Hz, equally spaced of 0.2 Hz, using 3803 panels to discretize the submerged ship's hull.

It was assumed that the crests of the waves travelled with a 20° angle to the longitudinal axis of the “Esso Osaka” (i.e. 110° angle between the longitudinal axis of the “Esso Osaka” and the wave number vector). One obtains the RAO's, obtained directly from the frequency-domain WAMIT. RAO is a quotient between the amplitude of the response,  $\zeta_k$ , and the amplitude of the excitation,  $\zeta_0$ , for a given frequency,  $\omega$ . Figure 5 to Figure 7 present the RAO's values for the roll motion for a subset of the 48 tests, namely those with engine power of 90% of the maximum engine power, for the three water depths.

The wake waves generated in the presented tests range in frequencies from 1.9 Hz and 2.8 Hz, but in the wave tank other oscillations were present as well. After a Fourier analysis on the gages time series, several other waves were identified. The resulting RAO's are presented in Figure 5 to Figure 7 include some of the more energetic waves.

There is a very good agreement between physical tests and numerical ones. Roll motion is highly amplified around 0.75 Hz. In addition to that, a significant part of the waves energy spectrum is in the low-frequency range, denoting the existence of, maybe, free-standing tank related long waves. The RAO's for these long waves were also well captured by the numerical model. The increase of RAO magnitude around 0.6 Hz is also clearly present in the physical tests measurements.

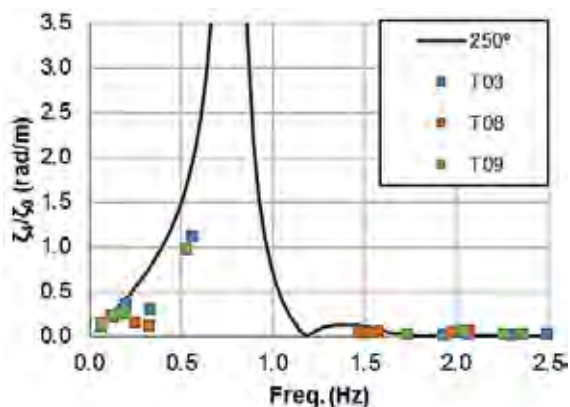


Figure 5. RAO's for roll motion, ( $h = 82$  cm)

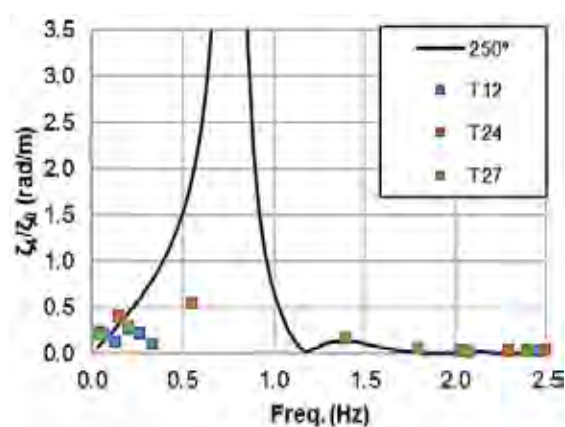


Figure 6. RAO's for roll motion, ( $h = 34$  cm)

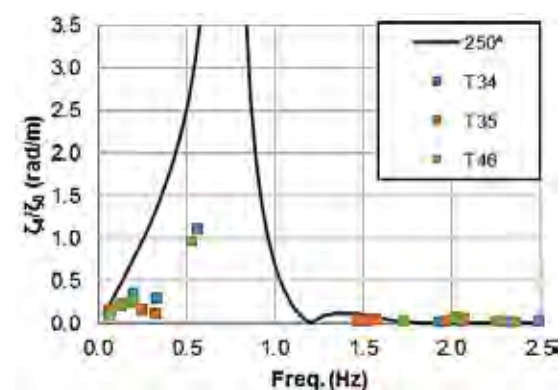


Figure 7. RAO's for roll motion, ( $h = 25.5$  cm)

## 5 CONCLUSIONS

To evaluate the velocity of the passing ship two approaches were used, laser scan measurements and wave gages measurements. Both approaches show similar results and an increased velocity as the engine power increases. In some case however, laser scan measurements are higher than the ones estimated from the wave gages.

The generated wake wave heights increase with the ship's speed, but as the standing ship is a large crude carrier, small length waves, such as ship wake waves have very little impact. On the contrary, long waves can produce significant movements on that ship. Although, not intentionally, long waves were present in the physical tank, and therefore their influence on the ship was noticeable. The comparison of the RAO's on the high and the low frequency spectrum range showed that the RAO's were well reproduced by the numerical model for both wake waves and long waves.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work is a contribution to the M&MSHIPS project "Maneuvering & Moored SHIPS in ports" (PTDC/EMSTRA/5628/2014) funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, and to the project IPL/2016/NAVnum\_ISEL funded by Instituto Politécnico de Lisboa.

## REFERENCES

- Korsemeier F.T., Lee C.-H., Newman J.N. and Sclavounos P.D. (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms, *7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, Texas, pp. 1-14.
- Mynett, A.E., Keunig, P.J. e Vis, F.C. (1985). The dynamic behaviour of moored ships inside a harbour configuration. *Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours*, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.
- Pinheiro, L. V.; Fortes, C. J.E.M.; Santos, J. A.; Fernandes, J. L.M (2013). Numerical Simulation of The Behaviour of a Moored Ship Inside an Open Coast Harbour. *V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2013*. B. Brinkmann and P. Wriggers (Eds).
- Santos J. A. (1994). *MOORNAV – Numerical Model for the Behavior of Moored Ships*. Final report. Lisbon: Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves.
- Verhey H. J. and Bogaerts M. P. (1989). Ship Waves and the Stability of Armor Layers Protecting Slopes. Publication No. 428 *Delft Hydraulics Laboratory*, Delft, The Netherlands.

## SWAMS: Novos desenvolvimentos.

L. Pinheiro (1), P. Lopes (1,2), P. Poseiro (1), C. Fortes (1) e J. Santos (3)

- (1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil. [lpinheiro@lnec.pt](mailto:lpinheiro@lnec.pt).  
 (2) Universidade dos Açores  
 (3) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

**Resumo:** Nesta comunicação apresenta-se os novos desenvolvimentos que estão em curso no sistema SWAMS ALERT, que é um sistema previsão, alerta e avaliação de risco de eventos perigosos associados à navegação em áreas portuárias e ao comportamento dos navios amarrados.

O sistema usa as características da agitação marítima previstas para determinar os seus efeitos em termos de forças em amarras e defensas, bem como de movimentos de um navio amarrado. Para isso, o sistema utiliza um conjunto de modelos numéricos. O sistema consiste em quatro módulos: I - Características da agitação marítima; II - Navegação em áreas portuárias; III - Avaliação de Risco e IV - Sistema de Alerta. A interface do sistema é através de uma plataforma web totalmente interativa e amigável. Ilustra-se a aplicação deste sistema ao porto da Praia da Vitória.

**Palavras-chave:** Navegação, previsão em tempo real; sistema de alerta.

### 1. INTRODUÇÃO

Os movimentos excessivos dos navios amarrados induzidos pela agitação marítima podem perturbar as actividades de carga e descarga dos navios bem como causar problemas graves, nomeadamente a rotura de amarras e a colisão dos navios com o cais. Daí a importância de uma caracterização correcta da resposta de navios amarrados aos estados de mar neles incidentes.

Neste âmbito, encontra-se em desenvolvimento no LNEC um sistema de previsão, alerta e avaliação de risco associado aos movimentos de navios amarrados, denominado sistema SWAMS\_ALERTA. Esse sistema está em funcionamento para o porto e baía da Praia da Vitória.

Nesta comunicação faz-se uma breve descrição do sistema SWAMS\_ALERTA, de previsão e alerta do risco associado à atracação de navios em zonas portuárias e ilustra-se a aplicação deste sistema ao porto de Praia da Vitória.

### 2. SISTEMA SWAMS\_ALERTA

O sistema SWAMS\_ALERTA é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado à navegação em zonas portuárias. O sistema utiliza pacote numérico SWAMS e a arquitetura do sistema de alerta HIDRALERTA (Fortes *et al.* 2015; Lopes *et al.*, 2016). O sistema utiliza as medições e previsões de agitação marítima para a determinação dos seus efeitos em termos de movimentos nos seis graus de liberdade e forças nas amarras e defensas quando o navio se encontra atracado no cais. Para tal, o sistema recorre a modelos numéricos. A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pre-

estabelecidos permite a avaliação, em tempo real, de situações de emergência e a emissão de alertas dirigidos às entidades competentes.

O SWAMS *Simulation of Wave Action on Moored Ships* divide-se em dois módulos: o módulo WAVEPROP – para a propagação das ondas e o módulo MOORNAV – para o comportamento do navio amarrado. O módulo de propagação de ondas WAVEPROP inclui 3 modelos numéricos para a propagação de ondas e um gerador de malhas de elementos finitos (SWAN, Booij *et al.* (1996); DREAMS, Fortes (1993); BOUSS-WMH, Pinheiro *et al.* (2011), e GMALHA Pinheiro *et al.* (2008)). O módulo de comportamento de navios amarrados MOORNAV, (Santos 1994) inclui dois modelos numéricos (WAMIT Korsemeier *et al.*, 1988; BAS Mynett *et al.* 1985).

O sistema é constituído por quatro módulos (Figura 1), I – Características da Agitação Marítima; II – Navegação em zonas portuárias; III – Avaliação do risco e IV - Sistema de Alerta.



Figura 1. Esquema do sistema SWAMS\_ALERTA.

A aplicação do sistema SWAMS\_ALERTA ao porto da Praia da Vitória, é efetuada todos os dias e permite



a previsão a 72 horas dos efeitos da agitação marítima em termos de movimentos dos navios acostados ao cais principal (cais 12).

Para a caracterização da agitação marítima ( $H_s$  – altura significativa,  $T_m$  – período médio,  $T_p$  – período de pico e  $\Theta$  - direção) ao largo da Praia da Vitória, o sistema utiliza, uma vez por dia, os resultados das previsões da agitação marítima, para as 72 horas seguintes, obtidos com o modelo WW III e que são disponibilizados pelo The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) de 3 em 3 horas. Para a área em questão, os dados do modelo WW III estão disponíveis com resolução de 1°, desde setembro de 2003. Os dados de vento regional e de níveis de maré, necessários para correr juntamente com os dados do modelo WW III no modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), são disponibilizados também pela FNMOC, através do modelo NAVGEM (Whitcomb, 2012), e pelo software XTide, respetivamente. Este último é um modelo de previsão de maré astronómica que dispõe de informações de marés desde 1700 até 2100.

Dos resultados apresentados pelo modelo WW III são extraídos os valores que se encontram mais perto da Ilha Terceira para que estes representem as condições de fronteira para os modelos que serão usados de seguida. Esses valores são transferidos para o interior do porto e da baía da Praia da Vitória com recurso aos dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima: o modelo SWAN e o modelo DREAMS. A utilização dos modelos e as suas condições de aplicação encontram-se descritas em Poseiro *et al.* (2014).

### 3. ANÁLISE DE RISCO

A avaliação de risco dos navios amarrados e baseia-se no conceito de nível de risco, ou seja, o produto do nível de probabilidade (associado com uma probabilidade de ultrapassagem de um limite pré-estabelecido) pelo nível de consequência (associada à mesma excedência).

Primeiramente avalia-se a natureza das atividades que têm lugar no local onde o navio está amarrado e o impacto dos seus movimentos na operacionalidade do terminal e na segurança do navio, da infraestrutura e das pessoas. De seguida, estabelecem-se os limites aos movimentos e às forças na amarração para cada tipo de navio e atividade, com base nos níveis de consequências estabelecidos para cada um. Finalmente determina-se a probabilidade de excedência desses limites e determina-se o nível de risco.

Os limites para os movimentos e forças são definidos com base nas recomendações existentes, tenham em conta a natureza das atividades, como definido pelo navio e uma necessidade de garantir a segurança das pessoas e infraestruturas. As consequências de exceder os limites foram calculadas usando uma metodologia que permite que uma simples avaliação

qualitativa do nível de consequência associado com eventos perigosos.

Os valores adotados neste trabalho baseiam-se nas recomendações da PIANC (1995) mas podem ser definidos caso a caso de acordo com critérios e normas internas de cada administração portuária.

Os limites aos movimentos horizontais, verticais ou de rotação dependem das consequências associadas. Existem limites operacionais, a partir dos quais a movimentação de carga fica condicionada ou mesmo impossibilitada e limites de segurança, a partir dos quais existe risco para as pessoas, os bens ou as estruturas.

Quanto aos limites aos esforços nos elementos de amarração, a OCIMF, por exemplo, recomenda que os esforços sejam distribuídos de forma uniforme pelas amarras e que estes não excedam 55% do esforço máximo de rotura.

A PIANC, através de grupos de trabalho, elabora com regularidade relatórios com recomendações de limites às alturas de onda, às amplitudes, às velocidades dos movimentos dos navios e aos esforços nos elementos de amarração de navios amarrados, assim como outras organizações ligadas à atividade marítimo-portuária (OCIMF, 1992; PIANC 1995).

Recentemente, um grupo de trabalho da PIANC atualizou as diretrizes para os movimentos máximos de porta-contentores amarrados que garantem uma operação de descarga eficiente (PIANC, 2012). Nesse relatório conclui-se que para grandes navios porta-contentores, a limitação do movimento de avanço é fundamental, uma vez que, hoje em dia, os guindastes não conseguem acompanhar esse movimento de forma eficiente. O mesmo relatório afirma que, quando os movimentos de avanço são mantidos dentro dos limites prescritos, os restantes movimentos acabam por ficar também eles dentro de limites aceitáveis.

Tabela 1. Níveis de consequência de exceder a amplitude de movimento.

Cons.	Nível	Avan.	Deriv.	Abati.	Rolo	Cab./Gui.
		(m)	(m)	(m)	(°)	(°)
<b>Insig.</b>	0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1
<b>Leve</b>	1	0.3	0.2	0.2	1.0	0.3
<b>Grave</b>	2	0.4	0.25	0.3	1.3	0.4
<b>Crít.</b>	3	0.5	0.3	0.4	1.5	0.5

Tabela 2. Níveis de consequência de exceder a velocidade de movimento.

Cons.	Nível	Avan.	Deriv.	Abati.	Rolo	Cab./Gui.
		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(°/s)	(°/s)
<b>Insig.</b>	0	0.1	0.1	0.1	1.0	1.0
<b>Leve</b>	1	0.3	0.3	0.3	1.5	1.5
<b>Grave</b>	2	0.45	0.45	0.45	1.8	1.8
<b>Crít.</b>	3	0.6	0.6	0.6	2.0	2.0

Tabela 3. Níveis de consequência de exceder as forças na amarração sistema.

Consequência	Nível	Amarras	Defensas
		(kN)	(kN)
Insignificante	0	100	1500
Leve	1	400	2000
Grave	2	600	2500
Crítica	3	900	4500

Para determinar a probabilidade de excedência desses limiares, é efetuada uma análise às séries temporais dos movimentos e velocidades do navio e das forças nas amarras e defensas. Cada série sofre uma transformação de Fourier sendo obtido um espectro de densidade em frequência. A partir deste espectro retira-se a informação estatística que permite obter-se a função de densidade de probabilidade (PDF):

$$PDF = \frac{x}{\sigma^2} e^{(-x^2/2\sigma^2)}, \text{ onde } \sigma = \frac{\bar{H}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}}$$

E a probabilidade de excedência:

$$P(H > x) = e^{(-x^2/2\sigma^2)}$$

Esta é classificada como rara ( $P < 0,001\%$ ), improvável ( $P < 0,1\%$ ), possível ( $0,1\% < P < 10\%$ ) e provável ( $P > 10\%$ ). O resultado da multiplicação do nível de consequência pelo nível de excedência leva a uma tabela de nível de risco para cada movimento, velocidade e forças. Os níveis de risco são dados na tabela 4.

Tabela 4. Níveis de risco.

Excedência	Níveis de probabilidade	Níveis de consequência			
		Ins	Lev	Grav	Crític
		0	1	2	3
Raro	$P < 0,001\%$	0	0	0	0
Improvável	$P < 0,1\%$	1	0	1	2
Possível	$0,1\% < P < 10\%$	2	0	2	4
Provável	$P > 10\%$	3	0	3	6

#### 4. SISTEMA DE ALERTA

Com base nos níveis de risco, são emitidos avisos.

Neste trabalho, cinco níveis de aviso foram definidos da seguinte forma:

- I.** Nível de risco de 0 ou 1 – Sem aviso. Não existe perigo.
- II.** Nível de risco de 2 – Aviso de risco baixo. Operações de carga e descarga condicionadas.
- III.** Nível de risco de 3 ou 4 – Aviso de risco moderado. Operações de carga e descarga suspensas.
- IV.** Nível de risco de 6 – Aviso de risco elevado. Operações de carga e descarga suspensas. Possibilidade de rotura dos elementos do sistema de amarração.
- V.** Nível de risco de 9 – Alerta máximo. Operações de carga e descarga suspensas. Possibilidade de rotura dos elementos do sistema de amarração. As infraestruturas podem ser seriamente danificadas.

Uma plataforma de web foi criada para permitir uma visualização de e análise de resultados. Os resultados

gerados pela avaliação de dados e avaliação de risco componentes tomam diferentes formas, ou seja, gráficos, mapas e relatórios. Estes são então transmitidos para a interface web e são emitidos os avisos.

Para a primeira aplicação deste sistema foi escolhido um navio e um posto de acostagem no terminal de contentores do porto de Praia da Vitória. Para a aplicação dos modelos WAMIT e BAS, é necessário definir as características do navio e do sistema de amarração. A metodologia encontra-se descrita em Pinheiro *et al.* (2013). O navio estudado representa um casco genérico do tipo porta-contentores com um volume deslocado de 12 717 m<sup>3</sup>, um comprimento na flutuação de 120 m, uma boca de 19 m e um calado de 8 m. A forma do casco foi discretizado com 3464 painéis retangulares e triangulares. Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 10 m. O navio está amarrado ao cais por 6 amarras (1 lançante à popa, outro à proa, duas regeiras e 2 traveses). O contacto entre o navio e o cais é impedido por cinco defensas pneumáticas. Considerou-se a mesma relação constitutiva para todos os cabos do sistema de amarração: variação linear desde 0 kN até à carga máxima de 931 kN a que corresponde uma extensão de 8%. A relação constitutiva das defensas também é linear sendo a força de compressão máxima 4900 kN para uma deflexão de 1 m.

Para cada valor de agitação marítima prevista no modulo I, e com base nos dados anteriores, determinaram-se as séries temporais das forças exercidas pela agitação marítima incidente no navio. São depois resolvidas, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado. Da resolução destas equações obtêm-se as séries temporais dos movimentos do centro de gravidade do navio e dos esforços no sistema de amarração.

Na figura 2 um exemplo da série temporal das forças na amarra ML4 é apresentado. As linhas tracejadas horizontais representam os limites previamente definidos. A densidade espectral é apresentada, usando a curva de probabilidade de excedência que fornece informações sobre quaisquer limiares.

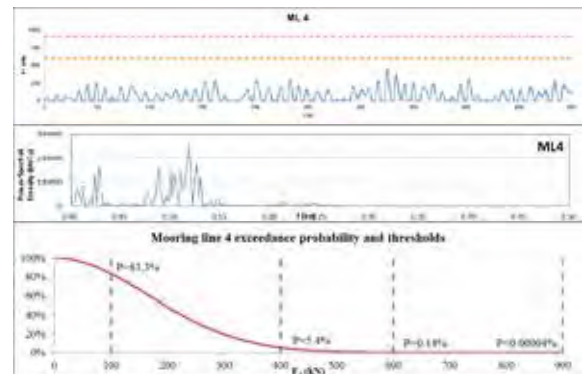


Figura 2. Amarra ML4. Série temporal de forças, densidade espectral e curva de probabilidade de excedência.

Tabela 5. Níveis de risco na amarra ML4.

Limiares de consequência	Insig.	Leve	Grave	Crítica
	> 100kN	> 400kN	> 600kN	> 900kN
Excedência prob.	83,3%	5,4%	0,14%	0,0%
Nível de consequência	0	1	2	3
Nível de prob.	3	2	2	0
Nível de risco	0	2	4	0

O nível de risco é selecionado com base no maior valor produzido. Neste caso o limiar de 600kN (ML4) com uma probabilidade de excedência de 0.14% produz um nível de risco de 4, tabela 5.

A mesma análise é feita para os movimentos e as velocidades.

Finalmente, a figura 3 apresenta o mapa de aviso gerados pelo sistema para as forças nas amarras, os movimentos e velocidades.

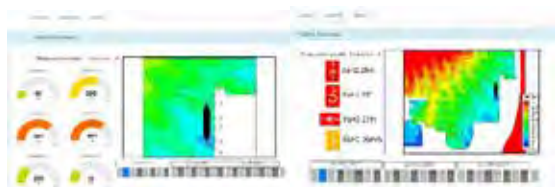


Fig. 9. Mapa de aviso gerados pelo sistema.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, o sistema SWAMS\_ALERTA tem acoplados todos os elementos necessários para a emissão de alertas em tempo real, mas ainda há alguns aspetos a serem melhorados, especialmente no módulo IV, no que diz respeito à definição dos níveis de alerta a considerar.

O trabalho futuro passa necessariamente pela validação do sistema, nomeadamente dos seus módulos II e IV, com a colaboração das autoridades locais e com a utilização de dados históricos, no sentido de garantir a fiabilidade do sistema. Mais ainda, é importante efetuar uma análise de risco detalhada com base na identificação das consequências que lhe possam estar associadas.

### Agradecimentos

Agradece-se o financiamento dos projetos HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB/120702/2010), e ESTRAMAR (MAC/3/C177 – FEDER 2007/2013). Agradece-se a colaboração da universidade dos Açores, Câmara Municipal da Praia da Vitória e Portos dos Açores.

## REFERÊNCIAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I,

Model description and validation. *Journal of Geographical Research.*, C4(104), 7649-7666.

Fortes, C.J.E.M. (1993). *Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., *et al.* (2015). Ferramenta de Apoio à Gestão Costeira e Portuária: o Sistema HIDRALERTA. *In Atas do VIII CPGZC*, Aveiro, Outubro 2015.

Lopes, P., Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., *et al.* (2016). Otimização da arquitetura computacional do sistema HIDRALERTA. *13º Congresso da Água*. 7, 8 e 9 de março de 2016, LNEC, Lisboa.

Korsemeier F.T., Lee C.-H., Newman J.N., Sclavounos P.D. (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms, *7th International Conference Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, Texas, pp. 1-14.

Mynett, A.E., Keunig, P.J., Vis, F.C. (1985). The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. *Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours*, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.

OCIMF (1992) *Mooring equipment guidelines*. Witherby e Co. Ltd.

PIANC (1995). *Criteria for movements of moored ships in harbors*. Technical report Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) Supp. to bulletin no. 88.

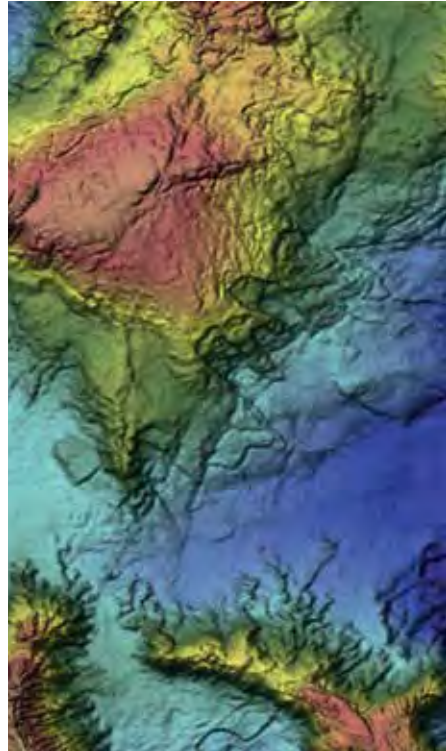
Pinheiro, L.V., Santos, J.A., Abecasis Jalles, B.M, Fortes, C.J.E.M. (2013). Aplicação da ferramenta SWAMS ao comportamento de um navio amarrado no terminal XXI do porto de Sines. *8 JPECP*, LNEC Lisboa, Portugal, Outubro.

Poseiro, P., Fortes, C., Reis, M.T., Santos, J.A. (2014). Aplicações do sistema de previsão e alerta do risco de galgamentos em zonas costeiras e portuárias: Costa da Caparica e Praia da Vitória. *In Atas do VI SEMENGO*, Rio Grande, Brasil.

Whitcomb, T. (2012). Navy global forecast system, NAVGEM: Distribution and user support. *In: Proceedings of the 2nd Scientific Workshop on ONR DRI: Unified Parameterization for Extended Range Prediction*.

# OCEANOGRAFIA OPERACIONAL

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA





# Método de previsão sonar operacional

P. Vale Marques (1), C. Lopes da Costa (1,2)

- (1) Escola Naval, Marinha, vale.marques@marinha.pt  
 (2) CINA V - Centro de Investigação Naval, Marinha

**Resumo:** Foi construída a ferramenta ‘Delfim’ em MATLAB para, a partir da base de dados WOD (*World Oceanographic Database*) de 2013 da NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*), com as funções da toolbox GSW (*Gibbs-SeaWater*), calcular o perfil de velocidade do som. Obtido este, em qualquer parte do oceano, resolve a propagação do som, através do método de *raytracing*, bem como as perdas de transmissão ao longo da propagação de cada raio. Com os restantes termos da equação sonar ativo ou passivo, resolve a propagação acústica e apresenta valores de alcance de deteção, anexos a um gráfico de excesso de sinal em função da distância percorrida pelos raios de som. Os resultados obtidos procuram auxiliar o planeamento e execução de operações submarinas e antissubmarinas.

**Palavras-chave:** *raytracing*, Delfim, equação sonar, deteção.

## 1. INTRODUÇÃO

A alargada permanência da energia sonora na água do mar dá origem aos mais diversificados processos como reflexões no fundo submarino e à superfície, reverberações provocadas por bolhas de ar ou seres vivos, amplificação em zonas de convergência ou atenuação por divergência. Todas estas condicionantes tornam a propagação acústica no oceano num processo complexo e, consequentemente, bastante difícil de modelar, prever e estudar. É neste contexto que surgem as teorias de modelação como o *raytracing*, que procuram o processamento automático de dados e, como consequência, uma previsão sonar válida e em tempo útil. A ferramenta Delfim – designação dada por alusão a cetáceo que vive no mar e que emite e recebe sons – pretende dar um contributo.

## 2. O DELFIM– PRESSUPOSTOS EMPÍRICOS

De forma semelhante aos inúmeros modelos de previsão sonar construídos até à data, também o Delfim partiu de pressupostos empíricos que garantissem a rapidez de processamento em tempo útil para o ambiente operacional, sem prejudicar a validade e coerência da previsão.

O *raytracing* foi utilizado como modelo de propagação, enquanto que as equações sonar possibilitaram o cálculo integrante de todos os fenómenos associados ao alvo, ao meio de propagação e ao equipamento sonar.

### 2.1. Raytracing

Segundo Urick (1983) p. 122, o *raytracing* assume que o som se propaga ao longo de raios perpendiculares às frentes da onda, que correspondem a superfícies de igual fase da propagação. De modo a permitir o cálculo computacional, o perfil de velocidade do som, da área em estudo, deve ser

dividido em intervalos pequenos o suficiente para que se possa admitir que, em cada intervalo, a velocidade do som varie de forma linear (Urick, 1983, p. 125). Cumprido o pressuposto da linearidade do gradiente da velocidade do som assume-se que, para um dado intervalo do perfil de velocidade do som, o trajeto do raio é um arco de circunferência com raio constante.

Para calcular as trajetórias dos raios sonoros, assim como as suas interações com a superfície e com o fundo do mar, é usada a função MATLAB atribuída a Val Schmidt, *University of New Hampshire* (acedido e retirado de [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26253-raytrace?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26253-raytrace?s_tid=srchtitle)).

### 2.2. Equações sonar

Segundo Urick (1983) p. 17, as equações sonar foram criadas depois da Segunda Guerra Mundial com o intuito de facilitarem a compreensão dos diversos fatores presentes na deteção de um alvo no mar e o modo como estes interagem entre si. Devido à relação logarítmica (valores expressos em dB) que os fatores das equações assumem, todas as operações necessárias são reduzidas a somas e subtrações, o que permite reduzir o volume de cálculos por cada previsão sonar. As equações sonar foram utilizadas em contexto ativo e passivo, respetivamente:

$$SE = SL - 2TL + TS - NL + DI - DT$$

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT$$

Ambas equações foram resolvidas de modo a obter o termo excesso de sinal (SE), que se traduz na quantidade (em dB) de sinal que ultrapassa o limiar de deteção definido (DT).

Os restantes fatores das equações representam sempre quantidades positivas e, consoante o operador que o precede, representam ganhos ou perdas de excesso de sinal. Os fatores SL, TS e DI representam

nomeadamente o nível sonoro da fonte, a refletividade do alvo e o índice de diretividade do equipamento. Intuitivamente, estes três termos potenciam a deteção, quanto maior for o seu valor. As perdas de transmissão (TL) resultam do somatório das dispersões geométricas e absorção da água do mar, que são função da distância percorrida pelo raio de som, e das perdas por interações com a superfície e o fundo. No caso da equação sonar ativo, as perdas de transmissão devem ser contabilizadas nos dois sentidos, transdutor-alvo-transdutor. O NL (nível de ruído) representa o conjunto de ruído produzido pela própria plataforma e ruído ambiente para uma dada frequência de receção. Sempre que o nível de ruído for superior ao nível do sinal, a deteção é improvável. Ainda que o nível do sinal seja superior ao nível do ruído a deteção pode não ser conseguida, tendo em conta o limiar de deteção (DT) estabelecido. Este valor representa a relação sinal-ruído necessária para que ocorra deteção do alvo e implica sempre uma perda no excesso de sinal.

### 2.3. Nível de reverberação

Ao contrário do ruído, a reverberação apenas entra nos cálculos do sonar ativo. Visto que o sonar ativo procura deteção através da receção do sinal emitido, após este ser refletido pela superfície do alvo, deve ser tida em conta possíveis reflexões por outros corpos que não o alvo desejado. A soma destas reflexões indesejadas designa-se por reverberação. A equação do sonar ativo adaptada a contexto de reverberação a dominar o ruído:

$$SE = SL - 2TL + TS - RL + DI - DT$$

A reverberação é, na prática, um valor que é estimado com recurso a estudos oceanográficos recorrentes e que é guardado fielmente pelas marinhas com capacidade de os produzirem, pelo que se recorreu a alguns métodos empíricos de Hodges (2010) pp. 149-154 e valores de referência referidos por Waite (2002) pp. 112-116.

## 3. O DELFIM – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A linha orientadora do desenvolvimento do Delfim caracterizou-se pela simplificação do trabalho do utilizador operacional e visualização simples, mas apelativa dos resultados.

O Delfim é alimentado pela base de dados oceanográfica da NOAA de 2013 (figura 1a), sendo, portanto, possível utilizar o *software* na ausência de um perfil de temperatura ou de velocidade do som. Esta capacidade de utilização em modo *stand-alone* não deve descurar informação atualizada, recolhida por via de sondas XBT. Posto isto, o Delfim possibilita introduzir o perfil de temperatura, substituindo o perfil climatológico nos pontos onde

existir informação introduzida pelo utilizador (figura 1b).

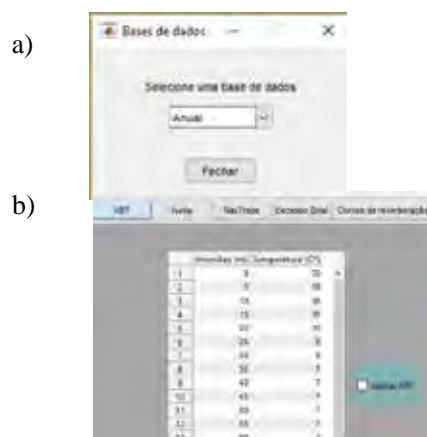


Fig.1. Menu de escolha da base de dados da NOAA (a). O utilizador pode escolher a base de dados anual ou por estação do ano com escala espacial de 1° ou 1/4° de latitude por longitude ou por mês com escala de 1°. O utilizador pode ainda preencher a tabela XBT com o perfil de temperatura da sua posição (b).

O utilizador pode visualizar os perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som, com possibilidade de aceder às coordenadas de cada ponto dos gráficos (fig. 2). Esta funcionalidade está disponível para qualquer gráfico do Delfim.

O perfil de velocidade do som resultante é posteriormente utilizado pela função *raytrace*, que calcula o traçado dos raios sonoros, como se mostra na fig. 3.

É importante referir que todos os cálculos de distâncias, de fatores que afetem a propagação e consequentes alcances de deteção são calculados raio a raio. Desta forma, os pontos de cor vermelha, presentes na figura 3, representam o alcance de deteção calculado para cada raio e os segmentos retos que os unem são uma estimativa do alcance entre raios.

O alcance de deteção é disponibilizado no gráfico de *raytracing*, já que todos os cálculos de excesso de sinal (SE) foram efetuados pelo programa.

Para o fator perdas de transmissão (TL) foi utilizada a fórmula de coeficiente de absorção de Ainslie e McColm de 1998 (Ainslie e McColm, 1998) e, no que diz respeito às perdas por dispersão geométrica, são apresentados dois métodos distintos. O método da dispersão esférico-cilíndrica permite adaptar o fator

$\beta$  da equação  $10 * \beta * \log(r)$ , de modo que, se  $\beta=1$ , dispersão cilíndrica e se  $\beta=2$ , dispersão esférica (Urlick, 1983, pp. 99-105). O método de afastamento vertical dos raios, também estudado por Urlick (1983) apresenta ainda uma forma de resolver o cálculo de TL para modelos de *raytrace*, partindo para uma expressão que integra a distância horizontal à fonte, mas também o afastamento vertical entre raios. A equação é consistente com o fenómeno que ocorre em

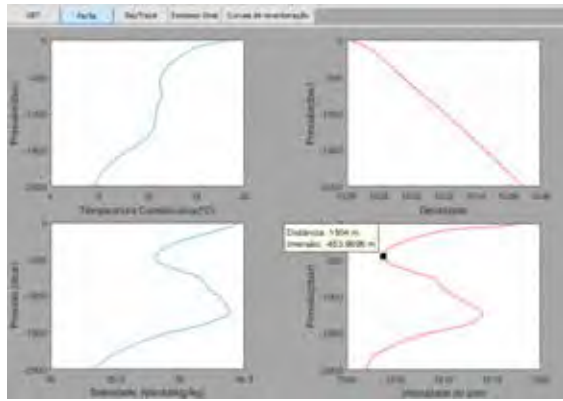


Fig. 2. Janela de visualização dos gráficos de perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som.

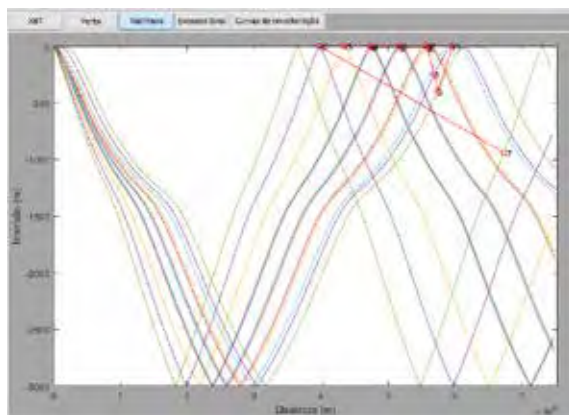


Fig. 3. Raytracing resultante do perfil de velocidade do som.

zonas onde o sinal amplifica por convergência ou é atenuado por divergência e é expressa pela fórmula,  $10 \log \frac{r \Delta h}{\Delta \theta} \frac{c_2}{c_1}$  (Urlick, 1983, pp. 126-128). Os dois métodos apresentam diferenças significativas, na ordem de 1 a 2 km para  $\beta=1,55$ , como se verifica pela figura 4.

No que toca a TL, o algoritmo de traçado dos raios de som resolve as reflexões dos raios de som no fundo e na superfície. No entanto, devem ainda ser calculadas as perdas associadas a estas interações. Posto isto, o Delfim tem um valor predefinido (em dB) por cada interação com a superfície e dependendo do tipo de fundo (figura 5), acumula as perdas por interação com o fundo.

O valor de índice de diretividade (DI) é estimado através da fórmula apresentada por Waite (2002) p. 34,  $DI = 10 \log(5 h d f_0^2)$ , aplicável sempre que o sonar do navio seja do tipo *array* cilíndrico e o utilizador introduza a altura (h), diâmetro (d) e frequência de trabalho ( $f_0$ ) (figura 6). Se as condições anteriores não se verificarem, existe sempre possibilidade de introdução do valor de DI diretamente na interface do Delfim.

O Delfim considera igualmente o nível de reverberação (RL) na sua previsão sonar. É feita uma comparação entre o RL e o nível de ruído (NL),

sendo, este último, uma soma dos valores pré-definidos de nível de ruído ambiental (ANL) e de ruído próprio. Visto que a deteção pode ser

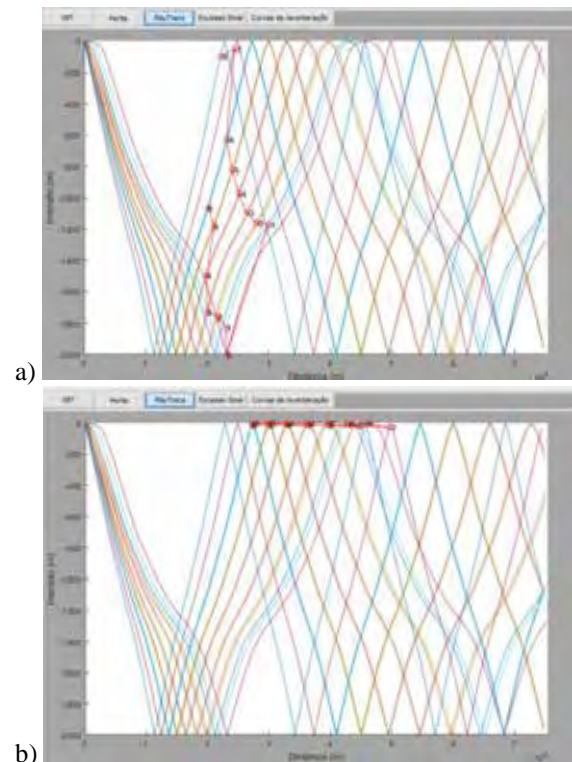


Fig. 4. Cálculo da distância de deteção com recurso ao método de afastamento vertical dos raios (a) e esférico-cilíndrico (b).

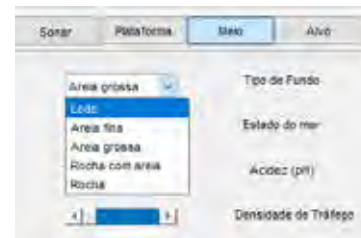


Fig. 5. Cada tipo de fundo acarreta um valor pré-definido de perda (em dB) por interação.



Fig. 6. Menu de introdução dos parâmetros do sonar. O utilizador pode também optar por introduzir diretamente o valor estimado de DI para o sonar (DI rx).



influenciada maioritariamente por um dos dois fatores, é escolhido o predominante, ou seja o que tiver um valor superior (em dB). O RL é dividido em de fundo, de superfície do mar e de volume, devendo ser estimado com recurso a estudos oceanográficos e biológicos efetuados para a área de operações (Hodges, 2010, p.152). O Delfim calcula o RL total com recurso apenas à soma dos valores de RL de superfície e de fundo, em função da distância à qual se dá a reflexão. O RL pode ser calculado com o SL, com a capacidade refletora do alvo (TSrev) e com as perdas de transmissão associadas à distância a que o reverberador se encontra do transdutor (2TLrev), através de  $RL = SL + TS_{rev} - 2TL_{rev}$  (Hodges, 2010, p.154), em que  $TS_{rev} = BS_{rev} + 10\log(A \text{ ou } V)$ . Assume-se que a área da superfície de reverberação é  $1 \text{ m}^2$  e  $TS_{rev} = BS_{rev}$ . Para o *backscattering* da superfície do mar é utilizada a  $BS_s = 9,9 \log [f h \sin(\phi)] - 45,3$  (Hodges, 2010, 8.28, p. 151). Nela  $f$  é a frequência (kHz) e  $h = 0,0026 v^{(5/2)}$ , sendo  $v$  o vento (nós) e  $\phi$ , o *grazing angle*(°). O *backscattering* do fundo depende do tipo de fundo, do *grazing angle* e da frequência de emissão. Foi consultada a figura 6.8 de Waite (2002) p. 115 e retirados os seguintes valores:  $BS_{lodo} = -45\text{dB}$ ,  $BS_{areiafina} = -40\text{dB}$ ,  $BS_{areiagrossa} = -36\text{dB}$ ,  $BS_{rochacomareia} = -33\text{dB}$  e  $BS_{rocha} = -27\text{dB}$ , aplicáveis para *grazing angles* inferiores a  $10^\circ$  e frequências até 10kHz. Desta forma é calculado o RL que, mesmo que não seja dominante comparativamente ao NL é colocado no gráfico das curvas de reverberação (figura 7), em que RLfundo tem cor vermelha, RLsuperfície, azul e RLtotal tem cor preta.

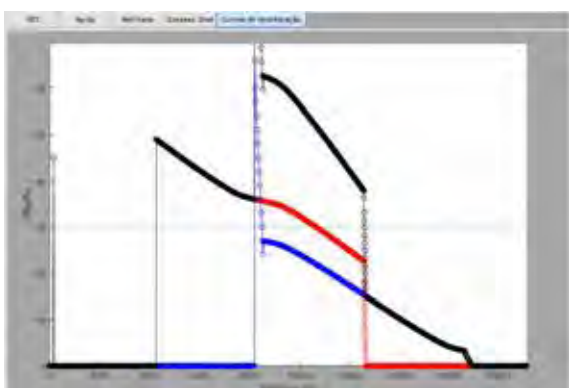


Fig. 7. Gráfico de curvas de reverberação, de superfície (a azul), de fundo (a vermelho) e total (a preto).

Finalmente, é apresentado o gráfico de excesso de sinal (fig. 8), que de certa forma indica a probabilidade de deteção do alvo, tendo em conta os fatores previamente introduzidos e calculados.

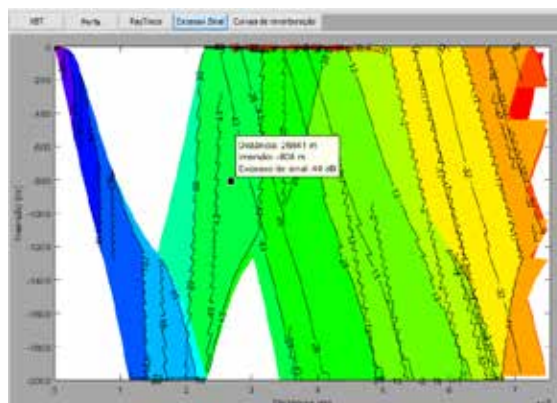


Fig. 8. Gráfico de excesso de sinal (em dB) por distância.

#### 4. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um modelo de previsão sonar com base nas teorias de *raytracing*, equações sonar e conhecimento empírico acerca dos fatores ambientais, do sonar e do alvo, influentes no processo de deteção acústica submarina.

O objetivo do projeto foi desenvolver um *software* de aplicação à escala global, apoiado na climatologia, sem necessidade de recorrer a dados com classificação de segurança ou estudos oceanográficos reservados às Marinhas e organismos que os desenvolvem. O Delfim está preparado para sobrepor dados XBT à climatologia, o que confere mais realismo no contexto de operações submarinas e antissubmarinas. O uso de apenas climatologia permite ser aplicado em contextos de planeamento de operações ou de apoio à formação e treino.

#### Agradecimentos

Agradece-se o interesse e contributo de todos os que ativamente contribuíram e fizeram crescer este projeto.

#### REFERÊNCIAS

- Ainslie M. A., McColm J. G., "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water", *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672, 1998.
- Hodges, R. (2010). *Underwater acoustics. Analysis, design and performance sonar*. John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed.1.
- Urick, R. (1983). *Principles of underwater sound, United States of America*. McGraw-Hill, Inc., ed.3.
- Waite, A. (2002). *Sonar for Practicing Engineers*. John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed.3.

## OPENCoastS.pt – Serviço de previsão em tempo real a pedido para a circulação na ZEE portuguesa

A. Azevedo (1), A.B. Fortunato (1), J. Teixeira (1), J. Rogeiro (1), A. Oliveira (1), M. Rodrigues (1), J. Gomes (2), M. David (2) e J. Pina (2)

- (1) LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: [aazevedo@lnec.pt](mailto:aazevedo@lnec.pt)  
(2) LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas.

**Resumo:** Os sistemas de previsão em tempo real desempenham um papel fundamental na gestão de risco e mitigação das consequências de eventos extremos em zonas costeiras. O leque de utilizadores destes sistemas aumentou significativamente nos últimos anos, englobando a comunidade científica e operacional do panorama nacional, gestores costeiros e empresas que desenvolvem aplicações que integram previsões em tempo real (aplicações para *surf*, vela, mergulho, observação de cetáceos, etc.). Este interesse crescente promoveu o desenvolvimento de uma plataforma interativa para geração de sistemas de previsão em tempo real da circulação para locais à escolha do utilizador. Esta plataforma, denominada OPENCoastS.pt, é baseada no WIFF – *Water Information Forecast Framework*, do LNEC, e será implementada na Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD). Este trabalho visa apresentar o serviço OPENCoastS.pt, tendo como exemplo o desenvolvimento de um sistema de previsão da circulação aplicado ao porto de Leixões e zona adjacente.

**Palavras-chave:** Sistemas de previsão em tempo real, Oceanografia operacional, ZEE Portuguesa, Infraestruturas Digitais.

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de previsão em tempo real, meteorológicos e oceanográficos, desempenham hoje em dia um papel fundamental na gestão de atividades como a aviação, tráfego marítimo, inundações urbanas (Henonin *et al.*, 2013), circulação costeira (Fortunato *et al.*, 2017), bem como atividades de lazer, como a vela ou o *surf*. Estes sistemas produzem diariamente previsões das variáveis físicas, e por vezes biogeoquímicas (Rodrigues *et al.*, 2016), de cada sistema em estudo, para o próprio dia e dias posteriores.

O desenvolvimento de um sistema de previsão em tempo real requer a combinação de um conjunto de competências e de ferramentas e o desenrolar de um conjunto padronizado de procedimentos. Tipicamente, um sistema de previsão é construído tendo por base a implementação local do modelo, particularizado para as condições de forçamento disponíveis para o domínio de estudo e customizado para providenciar os produtos que respondam aos requisitos das entidades destinatárias. Esta abordagem requer: i) um conhecimento aprofundado do modelo e do sistema costeiro a modelar, por parte do operador do modelo; ii) conhecimentos de Tecnologias da Informação (TI), os quais poderão ser mais exigentes quando a disponibilização atempada das previsões requer um ambiente de simulação de elevado desempenho, baseado em computação paralela; e ainda iii) a disponibilização de ferramentas ou de outros sistemas de previsão que permitam definir as condições de fronteira e sobre o domínio, disponibilizadas diariamente ou com uma

periodicidade ainda maior, para uma correta representação do sistema a modelar.

O desenvolvimento destes sistemas requer um esforço considerável na sua continuidade e manutenção. A sua atualização a novos forçamentos ou a novas fontes de comparação automática com sensores online requer sempre uma intervenção relevante de equipas incluindo especialistas em TI e na modelação de processos costeiros. Os custos associados à operacionalidade dos sistemas de previsão em tempo real tornam-se assim frequentemente proibitivos para muitas entidades gestoras ou para as equipas de investigação que os pretendem utilizar quer na compreensão de processos quer como ferramentas operacionais de suporte a atividade de monitorização *in situ*.

Este trabalho apresenta uma nova geração de plataformas de previsão em tempo real para as zonas costeiras que visa ultrapassar/reduzir estas dificuldades e facilitar o acesso aos sistemas de previsão em tempo real a quem deles precisa, para gerir a zona costeira, investigar a sua dinâmica ou mesmo usufruir dela para lazer. A metodologia apresentada visa agilizar a implementação e a manutenção de um sistema de previsão em qualquer local à escolha do utilizador. A implementação do sistema de previsão é realizada através do serviço OPENCoastS.pt, o qual tira partido da Infraestrutura Nacional de Computação Avançada – INCD, integrada no Roteiro Nacional de Infraestruturas da Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Este artigo está organizado em 3 secções para além desta introdução. Na segunda secção são

apresentados os componentes que constituem o sistema OPENCoastS. A secção 3 descreve sucintamente o protocolo de implementação de um sistema de previsão através deste serviço. Na 4 secção, as conclusões, identificam-se algumas considerações finais e propostas de investigação a curto e médio prazo desta nova plataforma.

## 2. COMPONENTES DO SISTEMA OPENCOASTS.PT

Nesta secção é apresentado cada um dos componentes de base do serviço OPENCoastS.pt. Este serviço é constituído por 3 componentes fundamentais: i) o sistema de modelação SCHISM; ii) a plataforma de previsão em tempo real do LNEC - WIFF; iii) e a infraestrutura de computação avançada INCD.

### 2.1. O sistema de modelação SCHISM

O SCHISM (*Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model*) é um sistema de modelação de código aberto, comunitário, baseado em malhas não-estruturadas, e desenvolvido para a simulação da circulação baroclínica tridimensional ao longo de escalas espaciais que vão do rio ao oceano (Zhang *et al.*, 2016). Utiliza um método semi-implícito de elementos e volumes finitos com um algoritmo Euleriano-Lagrangiano para resolver as equações de Navier-Stokes, para lidar com um vasto conjunto de processos físicos e biológicos. Todos os módulos do sistema SCHISM estão paralelizados em MPI, e partilham a mesma malha e partição.

O sistema de modelação SCHISM inclui módulos para os principais processos costeiros, incluindo a agitação marítima (Roland *et al.*, 2012), a qualidade da água (*e.g.*, Rodrigues *et al.*, 2009, 2011) e a dinâmica sedimentar (Pinto *et al.*, 2012, Guerin *et al.*, 2017). No âmbito do serviço OPENCoastS.pt, dada a sua natureza exploratória, as simulações serão limitadas à modelação bidimensional da circulação e da agitação marítima.

### 2.2. A plataforma de previsão em tempo real do LNEC – WIFF

O *Backoffice* de processamento do serviço OPENCoastS.pt assenta na infraestrutura de previsão em tempo real desenvolvida pelo LNEC nos últimos 10 anos. Designada por WIFF - *Water Information Forecast Framework* (<http://ariel.lnec.pt>), foi iniciada em 2007 para a previsão da circulação bidimensional barotrópica da Ria de Aveiro (Oliveira *et al.*, 2010), tendo sido depois alargada à previsão da agitação marítima no Atlântico Norte e costa Portuguesa (Ribeiro *et al.*, 2010), à circulação acoplada ondas e correntes (Fortunato *et al.*, 2017) e à circulação 3D baroclínica (Rodrigues *et al.*, 2016), ambas no estuário do Tejo.

### 2.3. A Infraestrutura de computação avançada INCD

A Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD – [www.incd.pt](http://www.incd.pt)) é uma infraestrutura digital

que tem como objetivo principal disponibilizar serviços de computação e armazenamento à comunidade científica e académica nacional, em todos os domínios do conhecimento. A INCD, que tem por membros fundadores a Associação INCD, o LIP e o LNEC, é uma evolução da infraestrutura de computação estabelecida em 2008 no âmbito da *Iniciativa Nacional Grid*, tendo sido financiada no âmbito do Roteiro Nacional de Infraestruturas de Investigação de Interesse Estratégico da FCT. A INCD está vocacionada para a prestação de serviços de computação e processamento de dados, em particular no apoio aos investigadores e a sua participação em atividades de I&D nacionais e internacionais. O suporte a atividades estratégicas como *ESFRIs*, outras infraestruturas do Roteiro Nacional de Infraestruturas de Investigação de Interesse Estratégico, participação no CERN, projetos apoiados pela FCT, e serviços de interesse público, assume particular relevância. A política de acesso da INCD contempla ainda a administração pública e a investigação no sector privado. Por conseguinte, esta infraestrutura digital encontra-se integrada em infraestruturas internacionais congéneres, tais como a *European Grid Infrastructure* (EGI), a infraestrutura Ibérica *IBERGRID*, e o *Worldwide LHC Computing Grid* (WLCG), com as quais partilha recursos computacionais.

A plataforma OPENCoastS.pt, devido aos seus elevados custos computacionais e de armazenamento, foi desenvolvida no âmbito dos projetos demonstradores das infraestruturas digitais INCD. No futuro, prevê-se o alargamento da sua operação à infraestrutura da *European Open Science Cloud*, no âmbito do projeto H2020 EOSC-Hub (<http://eosc-hub.eu/eosc-hub-integrated-services-european-open-science-cloud>).

## 3. CRIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PREVISÃO A PEDIDO PARA O PORTO DE LEIXÕES

Esta secção ilustra as funcionalidades da plataforma web OPENCoastS.pt e a utilização da mesma no estabelecimento de um sistema de previsão da circulação aplicado ao Porto de Leixões.

O acesso ao serviço OpenCoastS.pt requer um registo prévio na plataforma. Depois do registo ser devidamente validado pelo LNEC, para confirmar a afiliação do utilizador, o requerente é notificado para ativar a sua conta com as credenciais que lhe forem atribuídas para *login* (Fig. 1) ou por autenticação federada (via EGI *check-in service*). Após o *login*, o utilizador é conduzido pelo protocolo de configuração do sistema através de um conjunto sequencial de menus (Figs. 2-6). O primeiro passo consiste na escolha do modelo a utilizar e respetiva versão, caso haja mais do que uma versão do mesmo modelo (Fig. 1b). A versão atual da plataforma apenas é disponibilizada a versão v5.4.0 do modelo

SCHISM. Novas versões do modelo serão incorporadas no serviço no futuro.

a)



b)



Fig. 1. a) Página de entrada do serviço OPENCoastS.pt e b) Passo 1: Escolha do modelo e da duração da simulação diária.

Neste passo define-se também o período de previsão (definido para 48h, simulando diariamente o próprio dia e o dia seguinte).



Fig. 2. Passo 2: Carregamento da malha de simulação e definição dos sistemas de coordenadas horizontal e vertical.

No 2º passo de configuração o utilizador define as informações relacionadas com o domínio de estudo (malha de simulação e sistemas de coordenadas horizontal e vertical –Fig. 2).

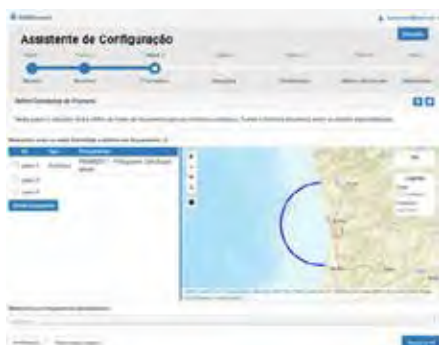


Fig. 3. Passo 3: Definição dos forçamentos oceânicos, fluviais e meteorológicos do sistema de previsão.

O passo 3 é dedicado à definição dos forçamentos oceânicos, fluviais e atmosféricos do modelo (Fig. 3). Atualmente, as fronteiras oceânicas podem ser forçadas pelo modelo PRISM2017 (Fortunato *et al.*, 2017), e num futuro próximo pelo modelo Ibérico do Copernicus – “CMEMS IBI Analysis Forecast Phys

005 001”. Os caudais médios mensais são definidos pelo utilizador para cada fronteira fluvial.



Fig. 4. Passo 4: Definição das estações virtuais para a obtenção de séries temporais do modelo e futura comparação com dados de sensores in situ.

O passo 4 destina-se à definição de pontos, à escolha do utilizador, para futura extração de séries temporais dos resultados do sistema de previsão (Fig. 4), em localizações de estações reais ou virtuais. Nos passos 5 e 6 são definidos todos os parâmetros utilizados no modelo SCHISM (Fig. 5).

a)



b)



Fig. 5. Os Passos 5 (a) e 6 (b) destinam-se à configuração do ficheiro de parâmetros utilizado pelo modelo SCHISM.

Para finalizar, no passo 7 é feito um sumário da configuração realizada e o utilizador pode submeter e ativar o sistema de previsão.



Fig. 6. Passo 7: Submissão e ativação do sistema de previsão.

Os sistemas de previsão criados por cada utilizador podem ser geridos no menu de gestão (Fig. 7). Neste painel o utilizador pode clonar um sistema pré-

existente para posterior alteração de parâmetros de configuração e parar ou apagar o sistema desenvolvido originalmente. O serviço OPENCoastS permite ainda que o utilizador faça *download* dos resultados dos sistemas de previsão criados.



Fig. 7. Página de gestão dos sistemas de previsão submetidos.

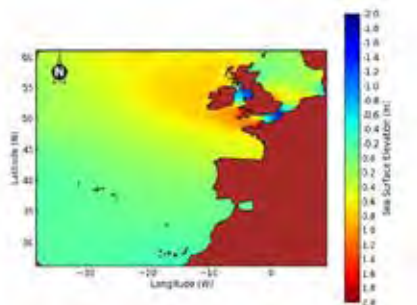


Fig. 8. Sistema de previsão de níveis para toda a ZEE Portuguesa (em desenvolvimento).

#### 4. CONCLUSÕES

O serviço OPENCoastS.pt apresentado neste trabalho permite que utilizadores com interesses na gestão costeira ou investigação possam: 1) criar sistemas de previsão em tempo real a pedido de forma simples e expedita, utilizando o sistema de modelação SCHISM; 2) ter acesso automático a dados de forçamento globais sem intervenção do utilizador no desenvolvimento de scripts de leitura e *download* dos dados; 3) ter acesso a um sistema atualizado de modelos, forçamentos e dados de sensores *in situ* (públicos); e 4) ter acesso a uma infraestrutura computacional de elevado desempenho, sem necessidade de conhecimentos adicionais de computação ou gestão de redes por parte do utilizador.

Em termos de desenvolvimentos futuros, prevê-se que uma nova versão do modelo PRISM2017 seja adicionada à lista de forçamentos oceânicos disponíveis, permitindo a obtenção de previsões de dados de níveis do nível do mar para toda a extensão da ZEE Portuguesa (Fig. 8). Prevê-se também a implementação do modelo FES2014 de forma a garantir forçamentos de maré para toda a Europa.

#### Agradecimentos

Projeto INCD, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P. (FCT), pelo Lisboa2020, pelo P2020 e EU (projeto nº 22153 - 01/SAICT/2016). A 6ª autora é cofinanciada pela FCT (SFRH/BPD/87512/2012).

#### REFERÊNCIAS

Fortunato AB, Oliveira A, Rogeiro J, Costa RT, Gomes JL, Kai Li, Jesus G, Freire P, Rilo A, Mendes A, Rodrigues M, Azevedo A (2017).

- Operational forecast framework applied to extreme sea levels at regional and local scales. *J. Operational Oceanography*, 10:1, 1-15.
- Guerin T, Bertin X, Dodet G (2016) A numerical scheme for coastal morphodynamic modelling on unstructured grids, *Ocean Modelling*, 104, 45-53.
- Henonin J, Russo B, Mark O, Gourbesville P (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling - a state of the art. *J. Hydroinformatics*, 15(3), 717-736.
- Oliveira A, Fortunato AB, Baptista AM, Turner P, Jesus G, Rodrigues M, Ribeiro NA, Mendes A, Fernandes JP, Azevedo A, Bruneau N, Dodet G, (2010). Sistema de previsão em tempo real para a circulação estuarina e costeira, *1as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa.
- Pinto L, Fortunato AB, Zhang Y, Oliveira A, Sancho FEP (2012) Development and validation of a three-dimensional morphodynamic modelling system, *Ocean Modelling*, 57-58, 1-14.
- Ribeiro, N, Rodrigues M., Dodet G, Jesus G, Oliveira A, Fortunato A.B, Azevedo A, Baptista AM, Turner P (2011). Sistema de previsão em tempo real da circulação e agitação marítima para zonas costeiras e estuarinas, *VI Congresso de Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 12pp.
- Rodrigues M, Rogeiro J, David LM, Fortunato AB, Oliveira A (2016). Análise de sensibilidade à incerteza dos forçamentos na previsão da qualidade da água em tempo real. *13º Congresso da Água*, 15pp.
- Rodrigues M, Oliveira A, Guerreiro M, Fortunato AB, Menaia J, David LM, Cravo A (2011). Modeling fecal contamination in the Aljezur coastal stream (Portugal), *Ocean Dynamics*, 61:841-856, doi: 10.1007/s10236-011-0392-9.
- Rodrigues M, Oliveira A, Queiroga H, Fortunato AB, Zhang YJ (2009) Three-Dimensional Modeling of the Lower Trophic Levels in the Ria de Aveiro (Portugal), *Ecological Modelling*, 220, 1274-1290.
- Roland A, Zhang YJ, Wang HV, Meng Y, Teng Y, Maderich V, Brovchenko I, Dutour-Sikiric M, Zanke U (2012) A fully coupled wave-current model on unstructured grids, *J Geophysical Research-Oceans*, 117, C00J33, doi: 10.1029/2012JC007952.
- Zhang YJ, Ye F, Stanev EV, Grashorn S (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64-81.

## Rede Maregráfica da Direção-Geral do Território

A. Medeiro (1), H. Ribeiro (1), M. Vasconcelos (1) e A. Bernardes (1)

(1) Direção-Geral do Território. amedeiro@dgterritorio.pt

**Resumo:** A DGT, através da sua Divisão de Geodesia, é o organismo responsável pela definição do *Datum* Altimétrico de Portugal Continental. Para cumprir essa missão tem instalado em Cascais um marégrafo analógico, a funcionar desde 1882, o qual está integrado nas redes internacionais de marégrafos. Devido à sua situação geográfica e à longa série temporal de registos, assume grande importância não só a nível nacional mas também para toda a comunidade científica. Além do marégrafo de Cascais, a DGT é também responsável pelo marégrafo de Lagos, a funcionar desde 1908, cuja principal função é a medição das variações do nível médio do mar na costa sul de Portugal Continental. Em 2003 foram adquiridos dois sistemas digitais acústicos, mais precisos, com capacidade de gestão remota, permitindo obter dados em tempo real.

Em 2018 a DGT pretende substituir os sensores acústicos por novos sensores, de tecnologia RADAR.

**Palavras-chave:** Marégrafos, Maregramas, Nível Médio do Mar, *Datum* Altimétrico, Nivelamento Geométrico.

### 1. INTRODUÇÃO

A rede maregráfica da DGT é constituída por dois marégrafos, instalados em Cascais e Lagos.

O marégrafo de Cascais, instalado em 1882, tem especial relevância, não só porque foi o primeiro a funcionar em Portugal mas, principalmente, porque os seus registos de 1882 a 1938 definiram a referência altimétrica para Portugal Continental. Devido à sua situação geográfica e à longa série temporal de registos, assume grande importância, tanto a nível nacional como para toda a comunidade científica, estando integrado nas redes internacionais de marégrafos.

A instalação do marégrafo de Lagos, em 1908, teve como principal intuito a medição das variações do nível médio do mar na costa sul de Portugal Continental.

Ao abrigo de um programa de modernização de equipamento, em 2003 foram adquiridos dois novos marégrafos, sistemas digitais acústicos, mais precisos e com capacidade de gestão remota, permitindo obter dados em tempo real. Além dos sensores de nível, foram também adquiridos sensores meteorológicos.

O marégrafo acústico de Cascais foi instalado em novembro de 2003, no edifício da Administração da Marina de Cascais. Este local garantia que o marégrafo recebesse diretamente o “mar aberto”, e não sofresse retardamento da onda devido à proteção da Marina e do quebra-mar.

Em Lagos, o marégrafo acústico foi colocado no mesmo poço do marégrafo analógico. Os dois instrumentos estiveram em funcionamento durante 3 anos, de modo a permitir a continuidade na série temporal de observações, mas infelizmente, em 2007, o marégrafo analógico foi desativado. O mesmo não aconteceu com o marégrafo analógico de Cascais que continua a funcionar até aos dias de hoje. Tal facto

deve-se também ao valor que este representa em termos históricos e culturais. Trata-se de um equipamento quase único, em perfeitas condições de funcionamento, que levou ao estabelecimento de um protocolo entre a Câmara Municipal e o ex-Instituto Geográfico Português, com vista à sua inclusão no roteiro turístico e cultural da vila. Dada a sua natureza, o edifício onde se encontra instalado o marégrafo analógico, junto à Cidadela de Cascais, em dezembro de 1997, foi classificado pelo Instituto Português do Património Arquitetónico (IPPAR), como imóvel de interesse público.

Devido aos avanços tecnológicos e de forma a poder prestar um melhor serviço à comunidade, a DGT pretende, ainda em 2018, adquirir dois novos marégrafos, fazendo a substituição dos sensores acústicos por sensores de tecnologia RADAR.

Os registos dos marégrafos permitem a monitorização contínua da variação do nível do mar e são alvo de muitos estudos e análises (Antunes, 2016). Entre outros, pode-se salientar o estudo da vulnerabilidade da linha de costa de Portugal Continental devido à subida do nível médio das águas do mar, como consequência das alterações climáticas (Antunes *et al.*, 2017). Com base nesses estudos, a comunidade científica e civil poderá definir estratégias e tomar medidas que minimizem os efeitos provocados pela ocorrência de quaisquer fenómenos climáticos extremos.

### 2. REFERENCIAL ALTIMÉTRICO DE PORTUGAL CONTINENTAL

O facto de a DGT ser a entidade responsável pela definição do *Datum* Altimétrico Nacional, levou o organismo antecessor, a então denominada, “Direção Geral dos Trabalhos Geodésicos, Topográficos, Hidrográficos e Geológicos do Reino”, a instalar, em 1881, em Cascais, um marégrafo analógico de Borrel. Após um período de testes este

marégrafo começou a funcionar em pleno no ano seguinte e continua em funcionamento até aos dias de hoje, sendo um dos mais antigos e raros equipamentos a nível mundial ainda em atividade e em perfeitas condições.

O sistema de referência vertical oficial de Portugal Continental é denominado por “Cascais Helmert 1938”. Este referencial foi definido a partir da média das observações do nível do mar em Cascais registadas no antigo marégrafo entre 1882 e 1938 (Vasconcelos, 2001).

A sua longa série temporal de registos permite tirar algumas conclusões sobre a variação do Nível Médio do Mar, como se pode observar na Figura 1. O estudo da sua evolução anual pode ser muito útil na avaliação dos impactos sobre a erosão costeira e os fenómenos de galgamento da linha de costa, bem como ajudar a definir estratégias de prevenção da ocorrência de futuras inundações ou outras catástrofes em zonas costeiras e ribeirinhas.

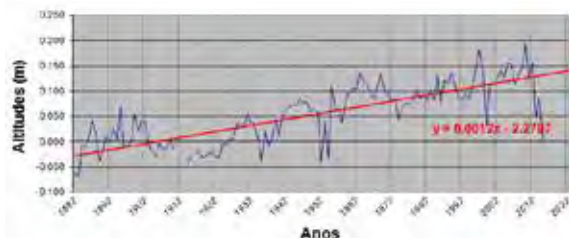


Fig. 1. Variação temporal do Nível Médio do Mar em Cascais (médias anuais dos registos do marégrafo analógico)

### 3. NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

De forma a garantir-se uma boa referenciação altimétrica e uma correta e adequada determinação do Nível Médio do Mar é necessário realizar-se periodicamente trabalhos de nivelamento geométrico de alta precisão, com o objetivo de avaliar a estabilidade do poço do marégrafo.

A marca fundamental da Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão, designada por NP 2M, materializada junto ao marégrafo de Cascais, assegura a ligação entre o nivelamento e o Datum Altimétrico. Existem várias marcas de nivelamento e respetivas testemunhas nas imediações dos dois marégrafos e também junto à Estação Permanente GNSS de Cascais. Tanto o marégrafo analógico, como o marégrafo acústico têm materializados nos bordos dos seus poços as designadas marcas de contacto dos marégrafos, que definem o “zero do marégrafo” e são as referências altimétricas para as leituras dos valores do nível do mar.

Devido ao facto de não ter sido possível instalar o marégrafo acústico no mesmo local do marégrafo analógico (a distância entre os dois é de cerca de 250 metros), foi necessário efetuarem-se observações de nivelamento entre as marcas de contacto de ambos os poços. Estas observações permitem o controlo de eventuais movimentos verticais locais, assim como a

atribuição de uma cota fidedigna à marca de nivelamento de referência do marégrafo acústico.

Das observações de nivelamento efetuadas, verifica-se que a marca do poço do marégrafo analógico se tem mantido estável ao longo dos anos. A marca do marégrafo acústico, devido ao abatimento da estrutura de suporte do poço da Marina, sofreu uma grande diminuição do valor da altitude no primeiro ano. Nos últimos anos tem-se verificado uma progressiva estabilização, como se pode constatar na Tabela I.

A marca de referência do marégrafo digital de Lagos é a mesma do marégrafo analógico, sendo também realizados periodicamente trabalhos de nivelamento geométrico de alta precisão, que têm permitido verificar a estabilidade da marca.

Tabela I. Altitudes ortométricas (m) das marcas de referência dos marégrafos analógico e acústico de Cascais, respetivas variações anuais (mm) e desnível observado entre as duas marcas (m)

Data	Analógico	$\Delta H$	Acústico	$\Delta H$	Desnível
Set. 2003	4,3073	-	3,623 0	-	0,6843
Mar. 2004	4,3073	0,0	3,586 7	-36,3	0,7206
Abr. 2006	4,3079	0,6	3,578 8	-7,9	0,7291
Jul. 2008	4,3077	-0,2	3,574 3	-4,5	0,7334
Jan. 2011	4,3079	0,2	3,568 8	-5,5	0,7391
Mar. 2014	4,3077	-0,2	3,564 5	-4,3	0,7432
Nov. 2015	4,3076	-0,1	3,562 5	-2,0	0,7452
Nov. 2016	4,3075	-0,1	3,560 8	-1,7	0,7467
Jan. 2018	4,3072	-0,3	3,559 1	-1,7	0,7481

### 4. EQUIPAMENTOS MAREGRÁFICOS: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Os equipamentos maregráficos da DGT começaram por ser analógicos (marégrafos de Borrel), passaram depois a sistemas digitais acústicos e futuramente passarão a ser de tecnologia RADAR.

#### 4.1. Marégrafo analógico de Borrel

O marégrafo de Borrel é um sistema de medição analógico, constituído por uma boia que está colocada num poço ligado diretamente ao mar. O movimento da boia é transmitido através de um sistema de cabos e roldanas a uma caneta que vai registando as variações do nível da água numa folha de papel, com uma quadrícula previamente desenhada, presa a um tambor rotativo. Um mecanismo relojoeiro faz girar este tambor. As linhas verticais da quadrícula da folha de papel representam as 24 horas do dia e as horizontais representam as alturas, em metros, do nível do mar relativamente à marca de contacto

situada no bordo do poço. É assim construído um gráfico, designado por maregrama, que possui o registo conjunto de 7 dias consecutivos. Para melhor identificar as curvas correspondentes a cada dia, o encarregado do marégrafo muda a cor da caneta, numa parte do dia de meia maré (Kol *et al.*, 2007). O funcionamento do marégrafo analógico está ilustrado na Fig. 2.

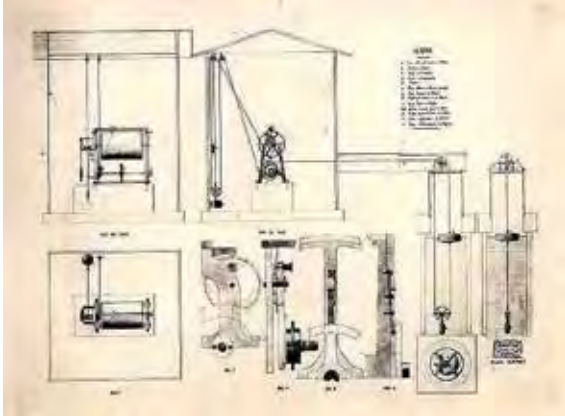


Fig. 2. Esquema de funcionamento do marégrafo de Borrel

#### 4.2. Marégrafo digital acústico

O sistema maregráfico instalado em Cascais em 2003, e no ano seguinte em Lagos, é do tipo *Aquatrak*.

A escolha deste tipo de equipamento deveu-se aos seguintes fatores: necessitar de pouca manutenção, resolução na ordem do milímetro, longo período de estabilidade sem necessidade de calibração, inexistência de partes móveis e robustez do sistema.

Além do sensor de medição do nível do mar, este equipamento possui também um sensor de medição da temperatura da água (localizado no interior do poço), um sensor de medição da pressão atmosférica e um sensor de medição da temperatura do ar (localizados no exterior).

O funcionamento destes sistemas baseia-se numa tecnologia simples, mas precisa, no que diz respeito a medições do nível do mar. Através de um microprocessador são transmitidos uma série de impulsos elétricos emitidos pelo sensor para um transdutor. O transdutor, por sua vez, converte os impulsos elétricos em impulsos acústicos e envia-os para a superfície do mar através de um tubo de sondagens. A função deste tubo é proteger os impulsos acústicos de fatores atmosféricos, tais como o vento, a chuva e a neve.

Este tubo subdivide-se em várias secções, cada uma com a sua função específica. O tubo de calibração assegura o retorno do eco a partir de uma distância conhecida. O tubo intermédio canaliza os impulsos acústicos para a superfície e da superfície. O tubo de equilíbrio permite corrigir o comprimento total do conjunto dos tubos de forma a que seja 20 centímetros menor que o poço de proteção. O tubo de cobre que está submerso permite manter a extremidade do tubo de sondagens livre de algas e animais marinhos.

Quando o sinal acústico passa pelo tubo de calibração, produz-se um eco que é enviado para o sensor. Esse mesmo impulso atinge a superfície do mar, produzindo-se um outro eco que é também enviado para o sensor. Esta técnica de medição é baseada na comparação do tempo que o impulso demora a percorrer uma distância conhecida (através do tubo de calibração) e a distância desconhecida até à superfície do mar (através do tubo de sondagem).

O sensor, por sua vez, inicializa o transdutor, cronometra e regista o eco que percorre o tubo de calibração e que é devolvido pelo impacto do impulso na superfície do mar. O microprocessador desmultiplica a distância do tubo de calibração, calculando a distância do sensor ao nível do mar, aplica *offsets* predefinidos, executa conversões e armazena toda a informação em formato ASCII, de modo a que o utilizador apenas tenha que descarregar os dados para posterior processamento. Na Figura 3 está ilustrado o funcionamento do marégrafo acústico.

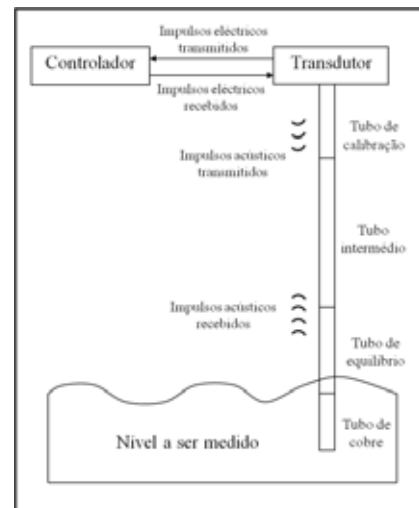


Fig. 3. Funcionamento do sistema digital acústico

A transmissão dos dados deste marégrafo foi feita inicialmente através do sistema de comunicações GSM móvel, mas uns anos mais tarde passou a ser feita em tempo real, via comunicações ADSL.

#### 4.3. Sensores de tecnologia RADAR

Os novos sensores, a adquirir pela DGT ainda em 2018, vão ser de tecnologia RADAR (Figura 4), permitindo obter precisões superiores às obtidas com sensores de outras tecnologias como os de ultrassons. Tratam-se de sensores que permitem a medição exata e contínua do nível do mar. Este sistema possui uma antena blindada, a principal responsável pela diminuta necessidade da sua manutenção. O seu funcionamento baseia-se em impulsos de microondas extremamente curtos, que são irradiados pelo sistema da antena sobre a superfície do mar, os quais são refletidos e novamente captados pela antena. Um método especial de extensão do tempo permite uma medição segura e precisa dos tempos extremamente



curtos dos sinais. A alimentação elétrica dos novos mareógrafos será feita através de painéis solares, reguladores de carga e baterias, o que se afigura também uma vantagem relativamente aos sistemas mareográficos digitais atualmente instalados.

A transmissão dos dados dos mareógrafos de tecnologia RADAR irá ser feita também em tempo real, mas em vez de comunicações ADSL, será utilizada a tecnologia 3G.

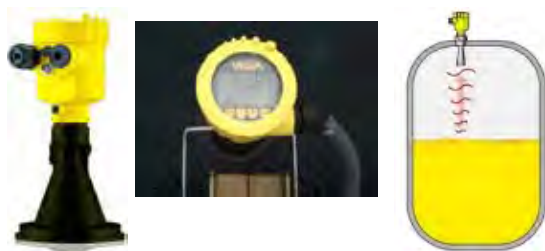


Fig. 4. Sensor de nível de RADAR

## 5. DIGITALIZAÇÃO DOS MAREGRAMAS

Para se obter a informação a partir do mareógrafo analógico é necessário proceder-se primeiramente à digitalização dos maregramas. O processo de digitalização inclui quatro fases principais: rasterização, referenciação das imagens, vectorização e recolha das leituras horárias.

Tendo em conta que o espólio de maregramas da DGT é muito vasto (cada maregrama inclui uma semana de registos), é fácil de concluir que se trata de uma tarefa bastante morosa. A primeira fase, ou seja, a rasterização dos maregramas, já se encontra concluída, sendo uma mais-valia a preservação digital desse espólio. As restantes fases ainda só estão feitas para cerca de 50 anos. De início, deu-se prioridade aos maregramas de Cascais e ao período em que os dois mareógrafos, analógico e digital, começaram a operar em simultâneo, bem como a alguns períodos específicos, em que aconteceram fenómenos sísmicos ou climáticos extremos, solicitados para diversos estudos.

Os dados provenientes dos maregramas foram também muito úteis quando o mareógrafo acústico esteve uns meses sem funcionar, permitindo complementar a sua série de dados.

## 6. COMPARAÇÃO DOS REGISTOS DOS MARÉGRAFOS ANALÓGICO E DIGITAL

De modo a poder verificar-se se existia coerência entre os dados dos mareógrafos analógico e acústico foram comparados os registos horários provenientes dos dois mareógrafos e calculadas as respetivas médias mensais para o período entre 2004 e 2010. Na figura 5 apresenta-se a comparação das médias mensais dos mareógrafos de Cascais para o ano de 2010 (Medeiro *et al*, 2011). Para os restantes anos analisados obtiveram-se variações análogas, mostrando uma boa consistência entre os registos dos dois mareógrafos (na ordem do centímetro).

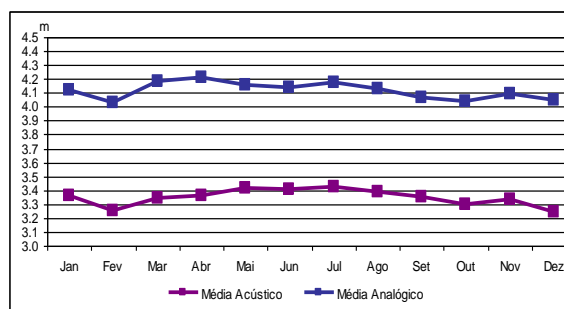


Fig. 5. Média mensal dos registos dos mareógrafos analógico e acústico no ano de 2010

## 7. PERSPETIVAS FUTURAS

Na reunião do Grupo de Trabalho “Geodesia2020”, onde participam elementos de diversos organismos públicos e de universidades, foi sugerida a cooperação interinstitucional entre as várias entidades que são proprietárias de mareógrafos, de modo a poder constituir-se a “Rede Mareográfica Nacional”, o que permitiria a existência de uma base geodésica para o estudo da evolução do nível do mar. Acreditamos que este projeto seria uma mais-valia para a comunidade científica nacional.

A adoção do referencial altimétrico EVRS (*European Vertical Reference System*) para o território continental, recomendado pela Diretiva INSPIRE, ainda está em fase de estudo mas será também uma preocupação da DGT num futuro próximo. Os registos dos mareógrafos são fundamentais para o estabelecimento de uma realização do EVRS em Portugal Continental.

## REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. *Atas das 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, 21 a 23 de junho, 163-166.
- Antunes, C., Rocha, C. e Catita C. (2017). *Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade Costeira*. Portal Smart Campus, FCUL, <http://smart.campus.ciencias.ulisboa.pt>.
- Kol, H. e Crisóstomo, G. (2007). *Marégrafo de Cascais*. Publicação interna. Instituto Geográfico Português.
- Medeiro, A., Bernardes, A., Figueiredo, M. e Vasconcelos, M. (2011). Comparação dos registos dos mareógrafos analógico e acústico de Cascais entre 2004 e 2010. *Atas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Porto, 5 e 6 de maio, 573.
- Vasconcelos, M. (2001). Ajustamento da Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão. *Documento técnico*. Instituto Português de Cartografia e Cadastro.

## OBSERVA.PT - Observações a bordo de navios comerciais nacionais nos ecossistemas do Mar Português\*

A.M.P. Santos (1;2), N. Lourenço (1), A. Carvalho (1), I. Sousa Pinto (3) e A. Oliveira (4)

- (1) IPMA-Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P., [amsantos@ipma.pt](mailto:amsantos@ipma.pt)
- (2) CCMAR-Centro de Ciências do Mar da Universidade do Algarve, [ampsantos@ualg.pt](mailto:ampsantos@ualg.pt)
- (3) CIIMAR-Centro Interdisciplinar de Investigação do Mar e Ambiente/FCUP
- (4) Transinsular-Transportes Marítimos Insulares, S.A. (Grupo E.T.E.)

**Resumo:** O objectivo principal do projecto OBSERVA.PT é implementar tecnologias adequadas de monitorização do meio marinho (e.g., satélites e termosalinógrafos) para a produção de informações oceanográficas e meteorológicas operacionais. Mais especificamente, o projecto assegurará actividades de monitorização de longo prazo no oceano aberto, pretende criar séries temporais bioceanográficas e mapear a sua variabilidade espaço-temporal, para apoiar a gestão adaptativo dos ecossistemas marinhos, avaliar a sua biodiversidade, melhorar a caracterização climática e as previsões meteorológicas para apoio às actividades marítimas. Estas observações contribuirão também como informação base para vários descritores da DQEM e para alargar o contributo nacional para organizações e programas internacionais (e.g., EuroGOOS, Euro-Argo e JCOMM). Irão ser instaladas estações meteorológicas e equipamentos oceanográficos de registo automático a bordo de navios de comerciais em rota de Portugal Continental para as ilhas da Madeira, Açores e Cabo Verde.

**Palavras-chave:** oceanografia, meteorologia, operacional, DQEM, ecossistemas.

### 1. INTRODUÇÃO

O Mar é um dos principais vectores de desenvolvimento nacional e de importância capital para um crescimento económico inteligente sustentável, em que um dos objectivos é a criação de emprego, de acordo com a estratégia Europa 2020 (“Estratégia para um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo”).

A grande extensão do Mar Português, com uma ZEE de mais de 1,7 milhões de km<sup>2</sup> e um acréscimo recente de cerca de 2,1 milhões de km<sup>2</sup> da proposta submetida para a extensão da plataforma continental jurídica, faz com que Portugal tenha jurisdição sobre cerca de 3,8 milhões de km<sup>2</sup> de território imerso. Isto trará muitas oportunidades para a exploração dos recursos marinhos e um aumento das actividades económicas relacionadas com o mar, mas também grandes desafios para a gestão, monitorização e utilização sustentável destes ecossistemas marinhos, que devem ser suportados num conhecimento profundo de todo este Mar Português. Este conhecimento só será possível com sistemas de observação do oceano a longo prazo, o que exigirá uma grande capacidade operacional e esforço financeiro. O esforço Português para a implementação da Directiva-Quadro da Estratégia Marinha (DQEM) é o mais elevado da União Europeia, sendo cerca de 16 ha/habitante (o valor médio dos estados costeiros da EU é de cerca de 1,3 ha/habitante).

No Mar Português existem vários montes submarinos, os quais são zonas extremamente

importantes para a biodiversidade. Os montes submarinos são habitats ameaçados e/ou em declínio de acordo com a convenção OSPAR. Por isso, Portugal pretende criar várias Áreas Marinhas Protegidas (AMP) no mar da sua jurisdição, pelo que considerou esta medida um objectivo específico do Mar2020. Concretamente, no Programa de Medidas da DQEM está previsto a criação de duas grandes AMP, uma a sul dos Açores (AMP do Great Meteor) e outra entre o Arquipélago da Madeira e a Costa Ibérica (AMP do Madeira-Tore). A primeira com 123 000 km<sup>2</sup> e a segunda com 132 000 km<sup>2</sup> (Fig. 1). No entanto, a informação relativa a estas áreas é escassa, especialmente no que respeita à caracterização do seu ecossistema pelágico e sua variabilidade temporal, bem como da sua biodiversidade.

Os diferentes Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) têm feito uma menção clara à falta de séries temporais de observações do ambiente marinho, na avaliação dos impactos climáticos, em comparação com outras zonas do Sistema Terra (e.g., criosfera). As enormes alterações que se esperam nos próximos anos a nível das condições climáticas (e.g. dos padrões de vento e da temperatura da atmosfera e do oceano e, o aumento da frequência de eventos extremos) originarão importantes alterações na base da cadeia alimentar marinha e na sua produtividade, bem como na distribuição e abundância dos níveis tróficos seguintes (e.g., peixes e crustáceos). Estas alterações são já evidentes em indicadores, como por exemplo, da temperatura da água do mar, das razões de equilíbrio dos nutrientes e da produtividade,

composição e distribuição planctónica, salientando-se ainda o expectável crescimento anómalo de algumas espécies autóctones nocivas e a ocorrência de outras, que até agora se tinham desenvolvido apenas em regiões tropicais. Prever em que medida as novas evidências das alterações climáticas irão afectar os recursos e a diversidade biológica dos oceanos, é fundamental para a sua gestão, a médio e longo prazo, permitindo que as políticas e investimentos socioeconómicos possam ser adaptados em conformidade.

Em conclusão, a aplicação de sistemas de observação do meio marinho, baseados em novas tecnologias de medição directa e na detecção remota (e.g., satélites e registadores contínuos), reveste-se de grande importância para a gestão dos recursos e sua conservação, pela grande extensão do Mar Português. Este necessita de metodologias adequadas à sua observação para disponibilizar dados fiáveis e completos, representativos da variabilidade e alterações a médio e longo prazo do ecossistema marinho. Estes dados são essenciais, tanto para os pareceres científicos, como para fins de execução e controlo de um desenvolvimento sustentável da economia do mar. Assim, esta proposta visa contribuir para a preservação e revitalização da biodiversidade na região da Macaronésia, através da produção de informação oceanográfica obtida de uma forma operacional com equipamentos de registo automático instalados em navios comerciais voluntários nacionais.

## 2. OBJECTIVOS DO PROJECTO

O projecto “OBSERVA.PT - Observações a bordo de navios comerciais nacionais para apoio à protecção e restauração da biodiversidade nos ecossistemas marinhos do Mar Português” pretende desenvolver métodos de registo automático de dados oceanográficos/meteorológicos e contribuir para o conhecimento do ecossistema pelágico do Mar Português. Os seus principais objectivos são:

- Implementar tecnologias de observação do ambiente marinho adequadas (e.g., satélites e equipamentos de registo contínuo), tendo em vista a produção de informação oceanográfica e meteorológica operacional, de apoio à gestão e conservação dos recursos e da biodiversidade e às actividades de pesca e navegação marítima no âmbito da vigilância meteorológica no mar.
- Garantir a realização de actividades de monitorização de longo prazo em oceano aberto, concretamente nas AMP Oceánicas.
- Cartografar a variabilidade espaço-temporal de variáveis oceanográficas, biológicas e espécies invasoras.
- Construir e manter séries temporais de índices bioceanográficos para apoio a uma gestão adaptativa dos ecossistemas marinhos, à avaliação da

biodiversidade e à melhoria da caracterização climática nesta região.

- Melhorar os indicadores de previsão numérica para a navegação e apoio às actividades marítimas.
- Alargar a contribuição Portuguesa em organizações internacionais para a afirmação de Portugal no contexto internacional dos assuntos do mar (e.g., EuroGOOS-European Global Ocean Observing System, Euro-Argo Program e JCOMM-Joint WMO/IOC Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology).



Fig. 1. Área de estudo: (a) Rotas de navegação regular dos navios comerciais do armador nacional, Transinsular (grupo E.T.E), que participa desde 2013 no programa de observação meteorológica voluntária no Mar Português (Programa VOS da EUMETNET); (b) O Mar Português, indicando-se a vermelho as novas Áreas Marinhas Protegidas oceánicas da Madeira-Tore e Great Meteor (infografia retirada e adaptada do jornal “Público”). A linha amarela a pontilhado em (b) representa as várias rotas dos navios da Transinsular.

## 3. ACTIVIDADES DO PROJECTO

### 3.1. Equipamentos e observações (Actividade 1)

Os fenómenos oceánicos que se pretende observar, ocorrem em escalas de variabilidade que vão dos

dias a décadas e da dezena à centena de quilómetros. Assim é necessário implementar vários sistemas de observação que cubram estas escalas. A escassez de dados ambientais nesta vasta região do Mar Português torna urgente que se implementem sistemas de observação adequados para colmatar tal lacuna e que se complementem. Os navios comerciais, que efectuem com grande regularidade estas rotas, são as plataformas ideais para a instalação destes equipamentos (**Tarefa 1.1**), permitindo uma regularidade temporal relativamente elevada e uma cobertura espacial aceitável. Assim, serão instalados 3 termosalinógrafos+fluorómetro e 3 estações meteorológicas a bordo de 3 navios da companhia Transinsular-Transportes Marítimos Insulares, S.A., pertencente ao Grupo Português E.T.E, nas rotas do Continente-Madeira-Açores e Continente-Cabo Verde (Fig. 1). Estes equipamentos registam em contínuo parâmetros oceanográficos e meteorológicos, que são transmitidos via o sistema GTS. Serão também recolhidas amostras de água superficial para medição de nutrientes e identificação de comunidades planctónicas, incluindo espécies não indígenas (**Tarefa 1.2**). Para a recolha de dados de ocorrência de cetáceos, 2 observadores treinados embarcam nos navios para a sua observação ao longo das rotas (**Tarefa 1.2**). Os observadores seguem o protocolo de monitorização em que recolhem a presença dos animais, espécie, tamanho do grupo, comportamentos e outros dados como as condições de visibilidade e informação de tráfego marítimo. Os dados de ocorrência são depois cruzados com dados de habitat (topográficos e oceanográficos) para estudar as preferências e desenvolver modelos de habitat e mapear as áreas de “hotspots” e de habitats preferenciais na área através da análise geo-espacial (ver **Actividade 2**). Os flutuadores Argo (Fig. 2a) são um dos meios de observação oceanográfica automáticos, que permitem estimar as correntes das camadas intermédias do oceano (~1000 m) e obter perfis verticais de temperatura e salinidade, bem como outros parâmetros biogeoquímicos, até aos 2000 m. No entanto, como são instrumentos derivantes com as correntes é necessário o seu lançamento regular para manter uma representatividade sinóptica das condições oceanográficas de todo o oceano e preencher as grandes lacunas que se observa em determinadas áreas do mesmo, nomeadamente da região em estudo (Fig. 2b). Estes flutuadores fazem perfis de 10 em 10 dias. A informação recolhida é transmitida, via satélite, para os centros de dados em terra. A vida média de um flutuador Argo é de cerca de 4-5 anos. A informação de todos os flutuadores activos no Mar Português será tratada e analisada neste projecto (**Tarefa 1.3**) e serão lançados flutuadores em colaboração com o Euro-Argo ERIC. Outro sistema de observação importante para observar grandes áreas da superfície do oceano é o baseado em informação obtida por detecção remota

com satélites, que permite a observação sinóptica com uma cobertura espacial e temporal adequada aos fenómenos oceanográficos (e.g., frentes, vórtices e o florescimento de microalgas). Vão ser utilizados dados obtidos com vários satélites (e.g., o Sentinel-3 e Aquarius/SAC-D) e sensores (e.g., OLCI-Ocean and Land Colour Instrument, SRAL-SENTINEL-3 Ku/C Radar Altimeter e o SLSTR-Sea and Land Surface Temperature Radiometer), com resoluções que vão das dezenas de metros à dezena de km e coberturas diárias (**Tarefa 1.4**).

### 3.2. Análise dos dados (**Actividade 2**)

A oceanografia operacional consiste na recolha sistemática e continuada de dados do oceano e da atmosfera, e a sua rápida interpretação e disseminação. Na base da assimilação dos dados estão modelos numéricos de previsão que fornecem diferentes produtos, dos quais se destacam a estimativa de evolução diária das correntes oceânicas e a estrutura termohalina associada. Apesar dos exercícios de validação, que têm vindo a ser feitos, mostrarem a crescente capacidade destes modelos reproduzirem as principais estruturas de circulação à escala das grandes bacias oceânicas, é importante aferir a qualidade dos resultados à escala regional. A conjugação e análise das diferentes estratégias de amostragem servirão para identificar e avaliar todos os processos meteo-oceanográficos relevantes para a biodiversidade e para estimar a distribuição e abundância dos organismos marinhos, tanto espacial, como temporalmente. Todos os dados serão sujeitos a controlo de qualidade, tratamento estatístico e, sempre que possível, serão utilizados na comparação com os parâmetros dos modelos oceânicos e atmosféricos (**Tarefa 2.1**). Os dados obtidos com satélites serão comparados estatisticamente com os dados in situ, para validação dos algoritmos existentes e, caso seja necessário, desenvolver algoritmos mais adequados para o Mar Português (**Tarefa 2.1**). Serão desenvolvidas metodologias de detecção automática de frentes oceânicas pela aplicação de operadores específicos (**Tarefa 2.1**). As comunidades planctónicas serão analisadas para identificar grupos funcionais que caracterizam os ecossistemas pelágicos das áreas em estudo e estudada a importância relativa, caso ocorram, de espécies não indígenas (**Tarefa 2.2**). Vão ser desenvolvidos modelos de habitat de cetáceos através de análises geo-estatísticas. Os dados de ocorrência de cetáceos serão correlacionados com os dados oceanográficos e meteorológicos para estudar as suas relações e preferências. A associação com frentes oceânicas (zonas de convergência e aglomeração de organismos) permitirá perceber até que ponto estas estruturas são importantes nas cadeias tróficas pelágicas em oceano aberto (**Tarefa 2.2**). Será feita a classificação do Mar Português quanto ao estado de eutrofização (**Tarefa 2.3**), utilizando o índice de eutrofização desenvolvido por Cabrita *et al.* (2015).

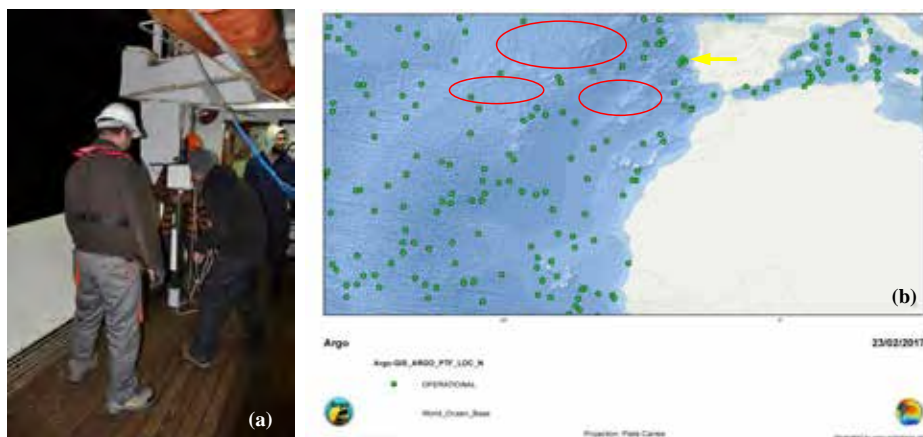


Fig. 2. Flutuadores Argo: (a) Lançamento do flutuador Argo WMO-3901909, no dia 29 de Dezembro de 2017, pelas 20:56, a bordo do NI Noruega do IPMA; e (b) Mapa com os flutuadores activos no Atlântico Nordeste, em 23 de Fevereiro de 2017 (Cortesia de Romain Cancouët, Euro-Argo ERIC). A seta amarela indica a posição do flutuador Argo WMO-3901909.

Este índice utiliza valores de nutrientes, transparência da água, fitoplâncton, clorofila e oxigénio dissolvido, obtidos *in situ* e por satélite.

### 3.3. Produção de informação (Actividade 3)

Os diferentes sectores de actividade relacionados com o mar (e.g., pesca, transporte marítimo, náutica de recreio e turismo) necessitam de informação de valor acrescentado para desenvolver, apoiar e realizar com segurança as suas operações marítimas. A gestão e conservação do oceano necessitam de uma monitorização contínua do estado ambiental dos seus ecossistemas e da sua biodiversidade, muito especialmente nas AMPs oceânicas. No entanto, esta monitorização tem que ser transformada em informação sintética e de fácil compreensão, que permita a sua utilização pelos diferentes decisores de política do mar. Assim, vão ser estimados os indicadores de base da DQEM (Tarefa 3.1), para os descritores da biodiversidade, espécies exóticas e eutrofização, bem como desenvolver metodologias para usar espécies de cetáceos para detectar o bom estado ambiental do meio marinho. As observações serão utilizadas operacionalmente nos produtos disponíveis para apoio à elaboração da previsão e vigilância meteorológica no mar (24h/7dias), aumentando significativamente a qualidade e fiabilidade das previsões meteorológicas e oceanográficas nas áreas sob responsabilidade nacional e viabilizando a produção de produtos de clima em mar alto (por exemplo, regimes de vento, tendências da temperatura média da água do mar e indicadores relevantes para a identificação da mudança climática e seus impactos) (Tarefa 3.2).

### 3.4. Bases de dados e cartografia (Actividade 4)

A organização e gestão dos dados é fundamental para qualquer sistema de observação e monitorização do oceano, bem como para disponibilizar esses dados para a Administração, empresas e comunidade científica, sendo também uma exigência para a elaboração dos futuros

relatórios da DQEM. Assim, será desenvolvida uma base de dados (Tarefa 4.1) e uma plataforma dinâmica de visualização em SIG (Tarefa 4.2),

### 3.5. Divulgação e comunicação (Actividade 5)

A literacia do oceano, a todos os níveis da sociedade, é fundamental para a sua conservação e sua sustentabilidade, pelo que é importante que se consiga transmitir, de uma forma acessível e interessante, as actividades e seus resultados. Assim, o projecto irá disponibilizar toda a informação na página do IPMA e irá colaborar com várias iniciativas de divulgação sobre os oceanos (e.g., IPMA-Escolas e Ciência Viva), para divulgar os resultados do projecto e sensibilizar a sociedade para a necessidade de observar e monitorizar a grande extensão do Mar Português, motivando os jovens para a ciência e para as questões do mar.

## 4. CONCLUSÕES

O relatório da DQEM (MAMAOT, 2012) refere a grande lacuna de séries temporais com uma deficiente cobertura espacial, concretamente nas zonas mais oceânicas, como é o caso da área que se pretende observar no projecto. Assim, o projecto OBSERVA.PT será uma contribuição importante para colmatar esta lacuna de informação.

**Agradecimentos:** OBSERVA.PT é financiado pela UE e Governo Português, no âmbito do Mar2020.

## REFERÊNCIAS

Cabrita, M.T., Silva, A., Oliveira, P.B., Angélico, M.M., e Nogueira, M. (2015). Assessing eutrophication in the Portuguese continental exclusive economic zone within the European marine strategy framework directive. *Ecological Indicators*, 58, 286-299

Nota: este documento não utiliza o novo acordo ortográfico.

# The role of high-resolution oil spill response models in emergency scenarios, The ATLANTIC POLEX.PT 2017 example

F. Martins (1,2) and J. Janeiro (1)

(1) Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA). E-Mail: fmartins@ualg.pt

(2) Instituto Superior de Engenharia (ISE), University of Algarve.

**Abstract:** The Portuguese coast is strongly vulnerable to sea hazards, particularly oil spills, due to intense vessel traffic and sea conditions. In this article, an operational integration of high-resolution oil spill response models is presented, supporting the ATLANTIC POLEX.PT 2017 exercise. Simultaneously two surface drifting buoys were deployed. The MOHID Lagrangian Oil Spill Model was used, forced by two different sets of forcing fields: One based on CMEMS and other based on SOMA. Results prove the adequacy of the method in supporting emergency responses. Standard error parameters obtained from comparison with buoy positions show good results, with errors of the same order of magnitude of those encountered in the literature. Comparison of trajectory distances with available operational forcing models highlighted the inadequacy of current operational met-ocean products. An evolution is proposed towards a set of integrated local high resolution models, covering the coast of Portugal.

**Key words:** Oil Spill, Operational Modelling, Drifting Buoys, Coast of Algarve, Decision Support

## 1. INTRODUCTION

Portugal is strongly vulnerable to sea hazards due to intense vessel traffic and sea conditions. Focusing on the southwest region off the Iberian Peninsula (Algarve) it lies in the main route from the Mediterranean and Southern Hemisphere to the Northern Europe. Tankers represent a significant part of the vessel traffic and the occurrence of oil spills cannot be disregarded (Janeiro *et al.*, 2012). Since 2007, EU Member States saw their surveillance capability regarding oil spills, strengthened with the creation of the European Maritime Safety Agency CleanSeaNet program. CleanSeaNet aims at identifying possible marine oil spills through satellite remote sensing. From late 2015, the European Space Agency mission SENTINEL-1 is responsible for providing this service. Satellite images are acquired and analysed to provide information regarding the potential for an oil spill. When a spill is detected, a pollution alert report is sent to national authorities with information regarding the detection including the level of confidence (low, medium, high) of it being a potential oil spill (EMSA 2012). For the 2008-2016 period, 500 CleanSeaNet oil spill detections were issued in the Portuguese Economic Exclusive Zone (Fernandes *et al.*, 2017).

In Portugal a national contingency plan towards hydrocarbon pollution - “Plano Mar Limpo” (PML) - was approved in April 1993. This plan gives overall responsibility for spill response to the National Maritime Authority and, in particular, to its coordinating body, the Maritime Authority Directorate General (DGAM). In the scope of PML, all relevant authorities responsible should prepare and develop suitable response mechanism towards an

efficient response in the event of an oil spill. This has been accomplished in the Algarve region through the oil spill exercise ATLANTIC POLEX.PT since 2016.

The processes that govern both the transport and weathering processes of oil in water are complex and depend not only from oil characteristics, but also from the hydrodynamic and atmospheric conditions at the spill site (Mackay and McAuliffe 1988). To deal with this complexity and transform it in a predictable solution, which is paramount to support planning and response activities, operational modelling systems coupled with models that can simulate the oil weathering processes are required. These operational modelling systems must be able to resolve coastal scale processes, thus providing enough accuracy to be and efficient response tool.

This work recognizes the importance of accurate information systems for decision-making processes in an oil spill situation. Towards that goal, an operational integration of high-resolution oil spill response models is presented, supporting the ATLANTIC POLEX.PT 2017 exercise (POLEX17). Results obtained were validated on site using real-time drifter trajectories, deployed during the initial stages of the exercise.

## 2. METHODS

Two modified MetOcean iSPHERE Oil Spill and Current Tracking buoys were deployed during the POLEX17 exercise. The GPS and communication components inside the buoys are SPOT devices from Orbital Satcom Corp., communicating by Iridium with a 5 minutes tracking rate. The buoys were used as a proxy of the hypothetical spill position. Additionally, the buoy positions were used as ground truth, to compare with the model results. Moreover, it

was possible to demonstrate the adequacy of this kind of equipment in oil spill emergencies.

The oil spill modelling approach used in this work is based in the MOHID modelling system ([www.mohid.com](http://www.mohid.com)). Specifically the “Lagrangian” module was used to simulate the buoy trajectories and the most relevant oil-weathering processes were included using the “oil” module. MOHID considers seven weathering processes: spreading, evaporation, dispersion, emulsification, dissolution, sedimentation and beaching (Janeiro et al., 2008). An Arabian Light crude oil was considered. The forcing fields necessary to run this Lagrangian model are Eulerian (gridded) fields of water currents and wind velocities. To plan response activities these forcing fields must be operational forecasts. Two different approaches for the forcing fields were used and compared during the exercise. One set of runs was conducted using forcing fields coming from the Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) IBI Regional Product PHYS\_005\_001, which provides 5 days hourly forecasts of water current velocities at 1/36° horizontal resolution (approximately 2.3 km). The meteorological forcing used on IBI are produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Another set of runs was conducted using forcing fields from the pre-operational regional downscale model for the coast of Algarve (SOMA), maintained by the authors at University of Algarve (Janeiro et al., 2017). SOMA downscales the CMEMS Global Product PHY\_001\_024, which provides 10 days daily forecasts of water current velocities at 1/12° horizontal resolution (approximately 7 km). The resulting SOMA solution have a 2 km horizontal resolution mesh. The meteorological forcing used on SOMA is produced by “meteoTecnico” using 9 km resolution MM5 model results ran at the Instituto Superior Técnico.

All models share the same vertical resolution with 50 z-level layers with a variable vertical resolution decreasing gradually down to 1 m near the surface. If the vertical grid resolution is sufficiently high, the wind stress imposed in the top layer of the hydrodynamic model should be sufficient to drive the Lagrangian model particles. For an oil spill, this would request a vertical resolution at the surface of the same order of the oil slick, which is impractical. The solution is to include explicitly a wind drag on the Lagrangian particles movement. Additionally, in this experiment we are comparing model results with drifting buoys, not with a real oil slick. The drifting buoy always possess a percentage of its body emerged, increasing the wind drag effect. The wind drag effect included in the Lagrangian model must thus account for those processes (Reed *et al.*, 1994). The wind forcing used to impose the wind drag in the particles is the same “meteoTecnico” product used in SOMA. Table I summarizes the origins of forcing data used.

## 2.1 Model Setup

The POLEX17 exercise was conducted at October 19<sup>th</sup>. 2017. The simulation runs started at October 16<sup>th</sup>. 2017 with available forecasts for the 19<sup>th</sup>. and were updated in successive days as new forecast become available. The simulation period was the same for all simulations, starting at 19/10/2017-08:00 and ending 20/10/2017-00:00.

Table I. Origin and characteristics of forcing data used in the simulations.

	“IBI” Runs	“SOMA” Runs
Hydrodynamic Model	CMEMS-IBI	SOMA
Horizontal Resolution	1/36° (2.3 km)	1 km
Vertical Resolution	50 z-layers (up to 1m @ surface)	
Wind Forcing	ECMWF	“meteoTecnico”
Wind Resolution	9 km	
Wind drag on particles	“meteoTecnico”	

The emission point for the model particles was selected at the centre of the “exercise box” as the exact buoy deployment positions were not available prior-hand. The simulation performed during the day of the exercise however, used the exact buoy deployment position for the emission point. Table II summarizes the simulations executed.

Table II. Lagrangian simulations executed.

Run #	Hydro. Forcing	Wind Drag	Execution Date	Line Colour in Fig. 1
1	IBI	Yes	16/10/2017 18:45	Yellow
2	SOMA	Yes	17/10/2017 14:00	Grey
3	SOMA	No	17/10/2017 14:00	Green
4	SOMA	Yes	18/10/2017 00:00	Orange
5	SOMA	No	18/10/2017 00:00	Dark Green
6	IBI	Yes	19/10/2017 07:00	Magenta

In every simulation, 1000 particles with a volume of 1 m<sup>3</sup> each were released at the surface, evenly distributed over a 250x250 m square box. The runs considering direct wind stress over the particles use a drag coefficient of 0.03. This value and other model parameters use calibrated values for the Portuguese Coast obtained from previous studies (Janeiro, 2015).

## 3. RESULTS

Fig. 1 show the buoy trajectories and the model results for the simulated runs. The model lines represent the centre of mass of the particle cloud.

As referred, only run #6 emitted particles at the position of the buoy deployment, because the exact position was not known in advance. In Fig. 2 a zoom of buoy and model positions is shown, including time stamps.



Fig. 1. Buoy and model trajectories. Buoys: black lines; Model runs: line colours as in Table II.

The buoys were recovered at 19/10/2017 13:00 preventing further comparisons. The separation distances between the buoys and the model centre of mass were computed and are presented in Table III.

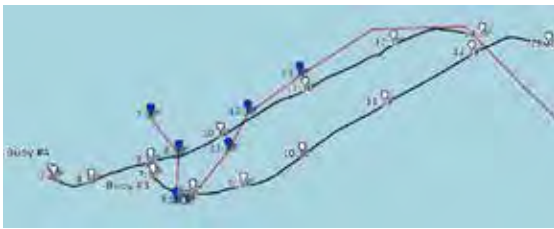


Fig. 2. Zoom of buoys and run #6 trajectories with time stamped positions.

The errors between buoy and simulated trajectories were also estimated using the trajectory-based non-dimensional index proposed by Liu and Weisberg (2011):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N l_i}$$

Where  $d_i$  is the separation distance between model and buoy positions at time step  $i$  and  $l_i$  is the respective length of the buoy trajectory.

Table III. Distances and errors between model and buoys.

Time	d #3 (m)	S #3	d #4 (m)	S #4
07:30	560	-	1085	-
08:30	390	0.88	856	2.38
09:30	647	0.76	439	1.00
10:30	1160	0.76	727	0.69
11:30	1509	0.70	907	0.54
12:30	2139	0.68	1482	0.50
13:30	2316	0.64	1743	0.47

#### 4. DISCUSSION

Buoy trajectories in Fig. 1 are quite similar for the two buoys, both in shape and in travelled distance, despite the deployment distance of 900 m between them. This behaviour correlates well with the met-ocean conditions of that day, with light to gentle breeze (Beaufort scale 2 to 3). Buoys #3 and #4 have travelled 4029 and 4246 m respectively, representing an average velocity of 0.2 m/s. With this conditions sub-grid turbulent processes are preponderant, influencing the comparison with model results. The horizontal resolution of the hydrodynamic models used to force the particles are 1 km for the SOMA simulations (Runs #2 to #5) and 2.3 km for the IBI simulations (Runs #1 and #6). In this last case, although, the forcing fields are interpolated to the same 1 km grid of the SOMA case. With these resolutions, the total length of the buoy trajectories during the 6 hours of the experiment covers only 2 cells in the case of the IBI forcing and 4 cells in the case of the SOMA forcing. The wind resolution is even smaller, with a 9 km grid, meaning the entire displacement of the buoys during the exercise lay inside a single wind cell. This context must be taken into consideration when comparing the model results with the buoy observations. Despite that, the model results of run #6 are able to reproduce reasonably well the buoy behaviour, as can be seen in Fig. 2. The direction and shape of the trajectory is similar, although the length is shorter in about 1500 m (37%).

The model discharge was located close -but not exactly over- the buoys deployment positions, because the exact deployment position was still not known at the beginning of the run. Due to this, the distances between the model and the buoys are not zero at the beginning of the exercise. Table III show that the initial distances between the model and the buoys are 0.6 km for buoy #3 and 1.1 km for buoy #4. During the exercise, these distances start decreasing as the model particles approach the buoy trajectories and then increase steadily towards a maximum distance of 2.3 km from buoy #3 and 1.7 km from buoy #4. Average distances between the centre of mass of the model particles and the buoys are 1.2 km for buoy #3 and 1.0 km for buoy #4. These distances are within the order of magnitude of the hydrodynamic model resolutions, which is remarkable, taking into consideration the mild met-ocean conditions of that day and the short period of the exercise. The errors were also evaluated using the non-dimensional  $S$  index as explained in the results section. Since  $S$  is a cumulative index, integrating the distances between model and buoy and normalizing it by the trajectory length, it is a more robust indicator of the error evolution along time. Results from Table III show that  $S$  start with relatively high values but maintain a sustained decrease in time toward values smaller than 0.5. The high initial value is due to the initial distance between buoy deployments and model release. This initial error is then progressively



attenuated by the good performance of the results. The order of magnitude of  $S$  is similar to the values Liu and Weisberg (2011) considered as good results.

Fig. 1 show the results for all model simulations. All simulations refer to the period between 19/10/2017-08:00 and 20/10/2017-00:00 but were executed in different days before the exercise using the available met-ocean forcing fields at the time, as summarized in Table II. Simulation #1, executed at 16/10/2017 and simulations #2 and #3, executed at 17/10/2017 show very similar evolutions. This seems to indicate that, at these scales, both SOMA and IBI are performing in a very similar way. The similitude between simulation #2, including wind drag on particle movement and simulation #3, without wind drag, seem to indicate wind drag is not an important factor for these met-ocean conditions. This is due to the mild conditions occurring in the simulation day, which were well forecasted by the two models. Simulations #4 and #5, executed at 18/10/2017 show a very distinct pattern, with the particles describing a tight anti-clockwise loop. The water current fields for the exercise day, predicted in day 18 show a very unstable structure composed by high frequency eddies. The simulations were forced by the SOMA model but the IBI fields show a similar structure. Results of simulation #6, executed at 19/10/2017 soon before the beginning of the exercise, show again a smoother trajectory, similar to the one obtained in simulations #1, #2 and #3. These results are relevant to show the degree of variability that can be encountered in forecasts while supporting response activities.

## 5. CONCLUSIONS AND PROSPECTIVE WORK

A Lagrangian oil spill model was used to demonstrate the potential of such tools in support of response activities during oil spills. The application was employed during the POLEX17 exercise, along with the deployment of two surface drifting buoys. Results prove the adequacy of the method in supporting emergency responses. The comparison of model and buoy results show the high variability of forecasted model results when transitory met-ocean conditions are present. The last forecast executed, concurrently with the start of the exercise and the deployment of the buoys, show good comparison with the buoy positions. Error parameters were computed for that run, showing results similar to those encountered in the literature. Comparison of trajectory distances during the exercise with available operational forcing models highlighted the inadequacy of current operational met-ocean product. In fact, the total trajectory length during the exercise was of the size of only 4 cells of the best resolution hydrodynamic model and smaller than one cell of the wind model. This clearly shows the need for much higher resolution met-ocean forcing fields. The authors believe the way to be paved is one including a set of

integrated local high resolution operational models, covering the entire national coast, assimilating the CMEMS operational products and complementing the forcing by assimilating also High Frequency Radar Fields.

## Acknowledgements

This work was supported by projects:

Project 0223\_OCASO\_5\_E (INTERREG ESPANHA-PORTUGAL)

AtlantOS GA633211-H2020-BG-2014-2015.

## REFERENCES

- EMSA (2012). *Addressing Illegal Discharges in the Marine Environment*, 100 pp.
- Fernandes, R., Campuzano, F., Brito, D., Juliano, M., Braunschweig, F. and Neves, R. (2017). Automated system for near-real time prediction of oil spills from EU satellite-based detection service. *International Oil Spill Conference Proceedings*. May 2017, Vol. 2017, No. 1, pp. 1574-1593
- Janeiro, J. (2015). *Development of an operational tool for oil spill forecast Application in oil exposed regions*. PhD Thesis, University of Algarve.
- Janeiro, J., Fernandes, E., Martins, F. and Fernandes, R. (2008). Wind and fresh- water influence over hydrocarbon dispersal on PatosLagoon, Brazil. *Mar Pollut Bull.*, 56, 650-665.
- Janeiro, J., Martins, F. and Relvas, P. (2012). Towards the development of an operational tool for oil spills management in the Algarve coast. *J. Coast. Conserv.*, 16, 449-460.
- Janeiro, J., Neves, A., Martins, F. and Relvas, P. (2017). Integrating technologies for oil spill response in the SW Iberian coast. *J. Mar. Syst.*, 173, 31-42.
- Liu, Y. and Weisberg, R.H. (2011). Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation. *J. Geophys. Res.*, 116,1-13.
- Mackay, D., McAuliffe, C.D. (1988). Fate of hydrocarbons discharge at sea. *Oil Chem Pollut.*, 5, 1-20.
- Reed, M., Turner, C. and Odulo, A. (1994). The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. *Spill Sci. Technol. Bull.*, 1, 2, 143-157.

## Downscaling CMEMS IBI 3D hourly solution

Leitão P. (1), A. Silva (1), J. Rodrigues (1), S. Bartolomeu (1) and J. Leitão (1)

(1) HIDROMOD, R. Rui Teles Palhinha, N°4, 1°, 2740-278, Porto Salvo. E-mail: [paulo.chambel@hidromod.com](mailto:paulo.chambel@hidromod.com)

**Abstract:** The IBI 3D hourly solution was tested as an alternative initial and open boundary condition to the present methodology used by Hidromod based in the CMEMS global forecast. The tests were done for an implementation of the MOHID model to the Algarve coast with a ~400 m horizontal resolution. Models results were compared with several observation data sources: Lagos tidal gauge, Faro buoy temperature, Algarve-Huelva HF radar for December 2017. The tests lead to the follow conclusions: (1) downscaling of IBI solution for domains restricted to the continental shelf area do not present any numerical limitations; (2) for domains where a significant percentage of the model domain is located outside of the continental shelf, there is the need of follow the same downscaling methodology used in the IBI solution. In this methodology extra salinity and temperature (spectral nudging) sinks/sources terms are added to force the density field to converge outside of the shelf to the CMEMS global solution.

**Key words:** Downscaling, hydrodynamic model, spin-up, nudging, CMEMS, MOHID, Algarve

### 1. INTRODUCTION

The operational IBI (Iberian Biscay Irish) Ocean Analysis and Forecasting system, daily run by Puertos del Estado, provides a 5-day hydrodynamic forecast including high frequency processes of paramount importance to characterize regional scale marine processes (e.g. tidal forcing, surges and high frequency atmospheric forcing, fresh water river discharge). This product covers a large area that goes from North of Ireland to the Canary Islands (Sotillo *et al.*, 2017).

IBI 3D hourly solution (foreseen to be publish in the CMEMS online in 2018) was tested as an alternative open boundary condition to the present methodology used by Hidromod based in the CMEMS global hydrodynamic forecast. The tests were done for the Algarve coast.

Two spin up technics were tested: one where the initial condition of the high resolution model is assumed equal to the IBI 3D hourly product and no restriction is imposed to the forcing terms; a second one where a slow connection of the forcing terms was used. The tests were done for December 2017. Models results were compared with several observation data sources: Lagos tidal gauge, Faro buoy (temperature) and Algarve-Huelva HF radar (surface currents).

Presently Hidromod downscales the CMEMS global solution via MOHID model implementations for different coastal areas of interest. In the IBI area Hidromod manages two models running daily covering the follow areas: West Iberia and Madeira archipelagos. In a second step these models are used to feed very high resolution models which supports a number of stakeholders\activities in areas such as ports, utilities, emergence response, aquaculture, etc.

Hidromod also supported the implementation of several systems running in forecast mode for the IBI area. The most notable ones are managed by:

- IST – PCOMS twin model of the one run by Hidromod for West Iberia (Mateus *et al.*, 2012);
- MeteoGalicía - covers the Galicia coast (Huhn *et al.*, 2012);
- Suez environment - French Bask country (Delpy *et al.*, 2014);
- Algarve University – Algarve coast (Janeiro *et al.*, 2017).

The main goal of this modelling exercise is to propose to MOHID users a methodology to use the CMEMS IBI 3D hourly product as reference solution to define initial and open boundary conditions of coastal/local scale implementations.

The Algarve coast was chosen as the testing area because:

- It is an area of great interest for developing downstream services (e.g. aquaculture is a fast growing activity);
- High frequency observations: buoys and HF radar data;
- It is an area with complex hydrodynamics (e.g. upwelling jet, Mediterranean outflow).

### 2. METHODOLOGY

The standard downscale methodology proposed by Hidromod to MOHID users is the following:

- **Reference solution:** Hidromod proposes a reference solution that results from adding linearly the CMEMS global solution, the astronomic tide global solution FES2012 and the inverted barometer approximation. This reference solution used to define the initial and open boundary conditions.

- **Open boundary conditions** (Leitão *et al.*, 2005):

1. Sea level and barotropic flow – Flather radiation condition;
2. 3D velocity, temperature and salinity - boundary relaxation scheme with a time scale equal to the period between two instants of the temperature/salinity reference solution (e.g. CMEMS global solution – 1 day) in the boundary cells. An exponential evolution of relaxation time scales from the border to the model domain interior along 10 cells;

- **Spin up/ Method 1:**

1. Initial condition: sea level, velocity, salinity and temperature interpolated directly from the reference solution;
2. Forcing: no restrictions;
3. Limitations: Experience shows that can only be used is shallow depths (< 300 m depth);

- **Spin up/ Method 2** (for a detailed description see Leitão *et al.*, 2005):

1. Initial condition: salinity/temperature equal to the reference solution, null velocity field and null sea level gradients;
2. Forcing: Slow connection of all forcing terms: wind, atmospheric pressure, baroclinic force, etc;
3. Limitations: long spin up periods (~3 days for domains with few hundreds of kilometers).

### 2.1 Algarve Test case

Two model domains were tested (Fig. 1): one restricted to the shelf area (Option 1) and another with the open boundaries located more off-shore (Option 2). In both domains to minimize the vertical interpolation errors a z-level vertical discretization similar to the IBI new product was assumed. Also for both domains a horizontal spatial resolution of  $0.004^\circ$  was used. The model bathymetry was defined using the bathymetric data available via EMODNET bathymetry portal. The atmospheric boundary condition was based in a WRF with 5 km horizontal resolution provided by the University of Aveiro. The initial and open boundary conditions, as described above, was based in the new IBI 3D hourly product. No river discharges were imposed.

For “Option 1” implementation the spin up “Method 1” described above was used. The “Method 2” was considered in the “Option 2” implementation. The modelling results analysis was limited to the period from 9 to 22 of December of 2017. To maintain consistency in both implementations a 5 day spin up period was assumed. All simulations started at December 4th of 2017.



Fig. 1. MOHID Option 1 and 2 model domains and bathymetry. Option 2 domain volume ~5 times greater than Option 1.

### 2.2 Validation data

The main strategy to validate the MOHID model implementations was to compare the model results with publicly available high frequency (3 h or less) observations for the area of interest. Additionally, the IBI solution was compared with the MOHID model results and observations. The follow observation data sources were used:

- HF radar – surface velocities (hourly);
- Faro buoy – sea surface temperature (every 10 minute);
- Lagos tidal gauge – sea level (every 5 seconds).

## 3. RESULTS

### 3.1 Potential and Kinetic Energy Evolution

One way to check the consistence of a downscaling procedure is to compare the evolution in time of the kinetic (KE) and potential (PE) energy average in space of the high resolution (MOHID) and reference (IBI 3D hourly) solutions. In the case of the MOHID Option 1 the evolution of KE and PE is quite similar to the reference solution (Fig. 2). However, this is not the case for the MOHID Option 2 where the PE after December 15 diverges clearly from the IBI solution (Fig. 3). KE diverge only significantly in the last few days.

In April 2016 the IBI downscale methodology was upgrade. The periodic weekly re-initialization was replaced by a spectral nudging technique (Katavouta and Thompson, 2016). This method permits to “nudge” the low frequency IBI system solution towards the large scale GLOBAL analysis in those areas where this global solution is expected to be more accurate (mainly off the shelf and in deep waters) due to the assimilation of lower frequency signals. This upgrade explains the perfect match of PE evolution of the IBI and Global CMEMS solutions after filtering out the semi-diurnal variability for Option 2 domain (Fig. 2).

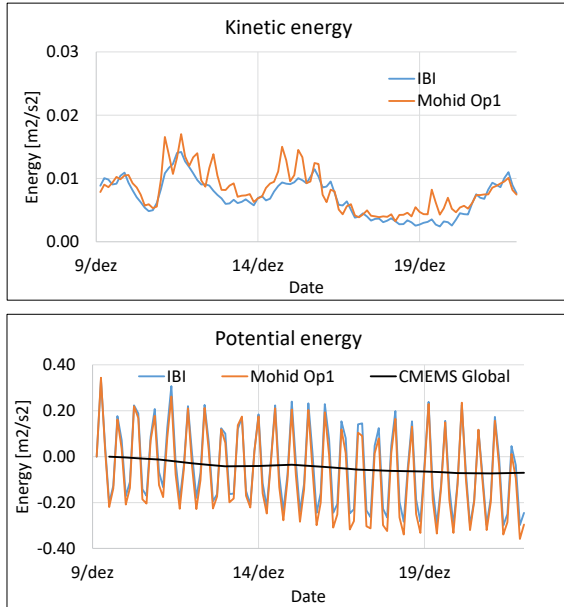


Fig. 2. Evolution in time of KE (upper panel) and PE (lower panel) average in space: MOHID Option 1 (orange line), IBI (blue line) and CMEMS global (black line).

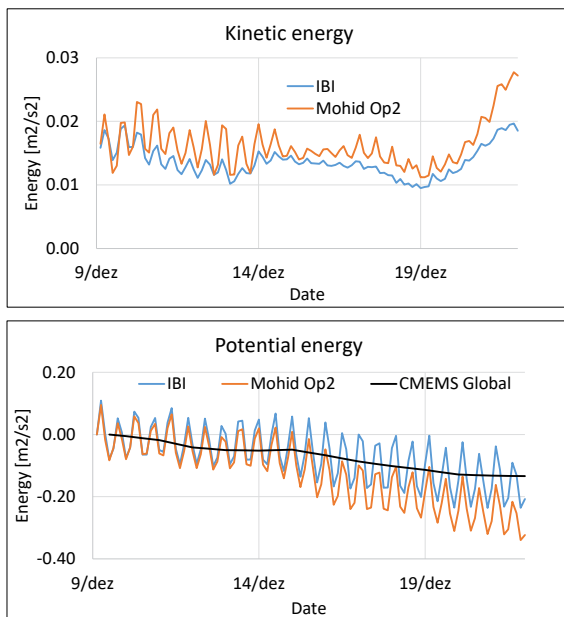


Fig. 3. Evolution in time of KE (upper panel) and PE (lower panel) average in space: MOHID Option 2 (orange line), IBI (blue line) and CMEMS global (black line).

### 3.2 Model vs Observations

The Algarve-Huelva HF Radar observations average velocity field show in the area of interest a persistent eastward/south-eastward direction (Fig. 3). The same can be observe in the IBI solution but there is a tendency for the velocities to present a southwest direction in the south border vicinity.

The average intensity of the IBI solution is approximately half of the observations. MOHID implementations present the same velocities direction of IBI solution but the average intensity is higher and more similar to the derived from observations. In the case of Option 1 the velocities

directions look to be quite similar to the observe ones.

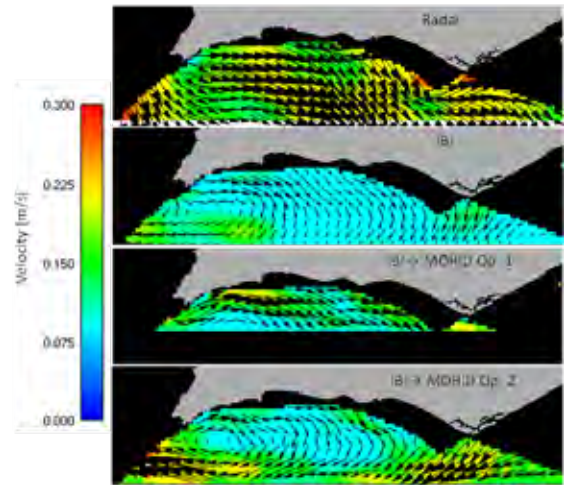


Fig. 4. Surface velocity field Average in time from the top: Radar HF, IBI, MOHID Option 1 and MOHID Option 2.

Option 1 present lower values of RMSE in time that IBI and Option 2 solutions. The zonal and meridional velocities correlation are quite similar to the IBI solution. The statistical metrics average in space shows the MOHID Option 1 present better agreement with observations (Table I).

Table I. Statistical metrics for the surface velocities components: RMSE and correlation in time average in space.

	RMSE U [m/s]	RMSE V [m/s]	Corr. U	Corr. V
IBI	0.17	0.13	0.34	0.33
MOHID Op.1	0.12	0.10	0.39	0.43
MOHID Op.2	0.21	0.11	0.42	0.40

The statistical metrics derived from this comparison are similar to the ones presented in the quality information document of the CMEMS product CMEMS-IBI-QUID-005-001 for the Algarve-Huelva HF radar (Sotillo *et al.* 2017).

The IBI and MOHID solutions present lower temperature values relatively to the data collect by the Faro buoy. In Table II the statistical metrics that summarizes the comparison of temperature between all analysed solutions are presented. The MOHID solutions present an average temperature slightly lower and more intense currents than the IBI solution. The more intense currents will induce stronger vertical mixing decreasing the surface temperature values. However, the average differences can be considered small ( $\sim 0.5$  °C).

Table II. Statistical metrics for the surface temperature for the Faro buoy location.

	IBI	MOHID Op.1	MOHID Op.2
Bias [°C]	-0.3	-1.0	-1.1
RMSE [°C]	0.5	1.1	1.2
Correlation	0.76	0.76	0.7

The MOHID solutions for the Lagos tidal gauge for the period of interest present an unbiased RMSE of 9.3 cm (Option 1) and 10.4 cm (Option 2). These values are similar to the ones of the IBI solution (8.4 cm see Table III). Again Option 1 presents a better agreement than Option 2 with observations.

Table III. Statistical metrics derived from the comparison of the Lagos tidal gauge sea level with the follow model solutions: IBI, MOHID Op. 1 and MOHID Op. 2.

	IBI	MOHID Op.1	MOHID Op.2
Unbiased [cm]	8.4	9.3	10.4
Correlation [-]	0.99	0.99	0.99

This result reinforce the overall better agreement of Option 1 downscaling methodology with observations for the area and period of interest.

#### 4. CONCLUSIONS

- For the analysed spatial/temporal windows the IBI 3D hourly solution is a good option for defining the open boundary conditions of MOHID model high resolution implementations;
- The downscaling of IBI solution for the model domain restricted to the continental shelf (Option 1) present a good agreement with observations and with the reference solution;
- For Option 2 (model domain where a significant percentage of the model domain is located outside of the continental shelf) there is tendency for the model results diverge in a significant way from the reference solution (IBI / Global CMEMS). A way of overcoming this problem is to implement a spectral nudging option in the MOHID source code similar to the one used in the IBI solution (Katavouta and Thompson, 2016).

#### Acknowledgements

The work was supported by CMEMS in the framework of the project “Lote 7 - Developing and Promoting Demonstrations of CMEMS Downstream Services”.

#### REFERENCES

- Delpey MT, Ardhuin F, Otheguy P, Jouon A. Effects of waves on coastal water dispersion in a small estuarine bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014; 119: 1–17.
- Huhn F, von Kameke A, Allen-Perkins S, Montero P, Venancio A, Pérez-Muñuzuri V. Horizontal Lagrangian transport in a tidal-driven estuary—Transport barriers attached to prominent coastal boundaries. *Continental Shelf Research*. 2012; 39–40:1–13.
- Janeiro J, Neves A, Martins F, Relvas P. Integrating technologies for oil spill response in the SW Iberian coast. *Journal of Marine Systems*. 2017; 173: 31-42.

Katavouta A. and K. R. Thompson, Downscaling ocean conditions with application to the Gulf of Maine, Scotian Shelf and adjacent deep ocean, *Ocean Modelling*, Volume 104, 2016, Pages 54-72, ISSN 1463-5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.007>.

Leitão P, Coelho H, Santos A, Neves R. Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach. *Journal of Atmospheric & Ocean Science*. 2005; 10(4): 421-462.

Mateus M, Riflet G, Chambel P, Fernandes L, Fernandes R, Juliano M, Campuzano F, de Pablo H, Neves R. An operational model for the West Iberian coast: products and services. *Ocean Science*. 2012; 8: 713-732.

Sotillo M. G., Levier B. and Lorente P. (2017). Atlantic -Iberian Biscay Irish- IBI Production Centre  
IBI\_ANALYSIS\_FORECAST\_PHYS\_005\_001\_b.  
Quality Information Document. Marine Copernicus.  
<http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf>

## Challenges for sustainable monitoring and evaluation of the EU Marine Strategy Framework Directive in the Atlantic offshore waters: the iFADO project

F. Campuzano (1), M. García (1), T. Dabrowski (2), S. Groom (3), M. Ruiz-Villarreal (4), V. Brotas (5), M. Kaufmann (6), S. Hartman (7), P. Oliveira (8), A. Martins (9), M. Juliano (10), F. Vieira (11), M. Lux (12), C. Barreda (13), X. Rebour (14), A.P. Simão (15) and R. Neves (1)

- (1) MARETEC- Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa. Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. [campuzanofj.maretec@tecnico.ulisboa.pt](mailto:campuzanofj.maretec@tecnico.ulisboa.pt).
- (2) Marine Institute. Rinville, H91 R673, Oranmore, Galway, Ireland.
- (3) Plymouth Marine Laboratory. Prospect Place, PL1 3DH, Plymouth, United Kingdom.
- (4) Instituto Español de Oceanografía. Centro Oceanográfico da Coruña, 15001, A Coruña, Spain.
- (5) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Campo Grande, 1749-016. Lisboa, Portugal.
- (6) Universidade da Madeira. Colégio dos Jesuítas, Rua dos Ferreiros, 9000-082, Funchal, Portugal.
- (7) Natural Environment Research Council. National Oceanography Centre, Waterfront Campus, European Way, Swindon, United Kingdom.
- (8) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA). Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 1495-165 Lisboa, Portugal.
- (9) Departamento de Oceanografia e Pescas. Universidade dos Açores, Rua Professor Doutora Frederico Machado, 9901-862, Horta, Açores, Portugal.
- (10) Universidade dos Açores, Lda. Edifícios da Marina, Apartado 64, 9760-412, Praia da Vitoria, Ilha da Terceira, Açores, Portugal.
- (11) Fundo Regional para a Ciência e a Tecnologia. Rua do Mercado 21, Ponta Delgada, 9500-326, São Miguel, Açores, Portugal.
- (12) Noveltis. 153 Rue du Lac, 31670, Labège, France.
- (13) Plataforma Oceánica De Canarias. Carretera de Taliarte, s/n, Telde, Gran Canaria, Spain.
- (14) Pole Mer Bretagne Atlantique. Rue Jim Sévellec 40, CS 83809 – 29238, Brest Cedex 3, France.
- (15) Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos. Av. Brasília, 1449-030, Lisboa, Portugal.

**Abstract:** The European Atlantic Area in situ characterization/monitoring is challenging due to the high costs involved (24% of total EU waters for 12% of total population). The implementation of the EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD) is complex if the objective is to extend periodic monitoring programs to offshore waters. Remote sensing and modelling have been recognised by the Copernicus Marine Service as suitable methodologies to characterise the global ocean both for nowcast and forecast. iFADO (Innovation in the Framework of the Atlantic Deep Ocean, 2017-2021) is an Interreg Atlantic Area project which main objective is to integrate technologies, including remote sensing, numerical modelling and in situ monitoring, to ease management decisions from MSFD competent authorities. The iFADO project builds on the most recent technologies for data gathering and processing, suited for providing sustainable services to blue economy agents by fostering the regional quadruple helix cooperation (public sector, university/research centres, enterprise and citizens).

**Key words:** remote sensing, numerical modelling, traditional monitoring, novel monitoring methodologies, MSFD, deep ocean

### 1. INTRODUCTION

The iFADO project (Innovation in the Framework of the Atlantic Deep Ocean) is a European project funded from ERDF funds of the INTERREG Atlantic Area Programme that will develop its activities during the period November 2018-2021. The project aims to create marine services at

regional and subregional scale using the EU Atlantic Waters as case study. By filling current technical gaps, the iFADO project will use the European Marine Strategy Framework Directive (MSFD, 2008/56/EC), including the recent MSFD Commission Decision (EU 2017/848), and its implementation to demonstrate the application of innovative products. The project will combine

traditional monitoring with cost-effective, state-of-the-art technologies: remote sensing, numerical modelling and emerging observation platforms such as gliders and new sensors equipped in oceanic buoys.

### 1.1. Overall objective

The Atlantic Action Plan aims to revitalize the Marine and Maritime Economy, recommending closer collaboration among member states such as to set up sustainable strategies for natural resources exploitation while promoting innovation and regional strategies that secure and enhance the marine and coastal environments. The European Atlantic Region (EAR) has the largest potential for “blue growth” due to, among others, its size, maritime tradition, and vast deep-sea areas available for exploitation. The Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) set up tools to monitor and forecast marine systems at the oceanic scale, foreseeing the subsequent development of innovative services by regional/local actors, oriented to the development of solutions at regional/local scales able to support authorities and investors. This project aims to downscale CMEMS products and to combine the conventional monitoring programmes with ocean buoys, satellite data and emerging technologies such as gliders, to develop tailor-made and innovative products. The latter will:

- 1) assist the MSFD competent authorities;
- 2) provide services at regional/local scales necessary to enhance the blue economy development;
- 3) contribute to the challenges posed by climate change;
- 4) provide tools for the optimisation of observing strategies for better forecasting; and
- 5) capitalise on individual partner initiatives and historical data based on an EAR perspective.

### 1.2. Common Challenge

The European Atlantic Area is specific for its extent and especially for having a narrow continental shelf and extensive deep areas. Hence, the influence of large-scale ocean circulation/dynamics extends almost up to the shore-line. Furthermore, its great surface area hinders detailed in situ characterization/monitoring due to its extremely high costs involved (24% of total EU waters for 12% of total population). The implementation of the MSFD is therefore, very challenging, particularly if the objective is to extend periodic monitoring programs to off-shore waters. Remote sensing and modelling have been recognised by the CMEMS as suitable methodologies to characterise the global ocean both for nowcast and forecast. The iFADO project aims to demonstrate that similar strategies are valid at the regional scale and that downscaling

is the most suitable mechanism to generate the required solutions and that new technologies are able to provide data in higher quantity, with wider spatial coverage and for remote marine areas. Institutions in charge of the implementation of the MSFD experience great difficulty in monitoring extensive areas. At the same time, it is those institutions that have more potential to both acquire/access in situ/historical local data necessary for validation. For these reasons, they have been included as Associated Partners, becoming the first generation of users of the system and important disseminators near marine economic actors.

### 1.3. Project Consortium

The iFADO partnership, involving 20 partners, will foster the regional quadruple helix cooperation including public sector, university/research centres, enterprise and end-users to ensure that the designed products meet the market needs and are sustainable after the project lifetime.

Table. 1. List of project partners, acronym and country. The partner role is indicated within brackets: Leader (L), Full (F) or Associated (A) partner.

Partner	Acronym	Country
Instituto Superior Técnico (F, L)	IST	Portugal
Foras na Mara - Marine Institute (F)	MI	Ireland
Plymouth Marine Laboratory (F)	PML	UK
Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (A)	DGRM	Portugal
Instituto Español de Oceanografía (F)	IEO	Spain
Faculdade Ciências da Universidade de Lisboa (F)	FCUL	Portugal
Universidade da Madeira (F)	UMa	Portugal
Natural Environment Research Council (F)	NERC	UK
Instituto Português do Mar e da Atmosfera (F)	IPMA	Portugal
Fundo Regional para a Ciência e a Tecnologia dos Açores	FCRT	Portugal
Direção Regional dos Assuntos do Mar (A)	DRAM	Portugal
NOVELTIS (F)	NOVELTIS	France
Secretaria Regional do Ambiente e dos Recursos Naturais (A)	DROTA	Portugal
Mercator Océan (A)	MERCATOR	France
Plataforma Oceánica de Canarias (F)	PLOCAN	France
Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (A)	MAGRAMA	Spain
Pole Mer Bretagne Atlantique (F)	PMBA	PMBA
Agence Française pour la Biodiversité (A)	AFB	France
Department of Housing Planning Community and Local Government (A)	DHPCLG	Ireland
Department of Environment Food and Rural Affairs (A)	DEFRA	UK

## 2. WORK PACKAGES

The project work is organised in eight work packages. Some brief comments are given for each work package (excluding the Administration WP1).

WP2 Communication: most of the project activities will be disseminated through the project webpage (<http://www.ifado.eu/>), and social media (twitter: [@AAiFADO](#), Facebook: [@AAiFADO](#); LinkedIn: [iFADO](#); vimeo: [iFADO](#)). The project will also target the sailing for pleasure community in order to be able to raise awareness related to the MSFD and to collect data in the offshore waters.

WP3 capitalisation: will allow to companies to evaluate their products within the iFADO consortium capacities (cruises and platforms). The project will ease the process by a common simplified memorandum of understanding (MoU) for collaborating with the consortium.

The project:

- will evaluate the capacities for enhancing and improving the traditional monitoring surveys focusing in the offshore areas (WP4);
- explore the cost-effectiveness of novel technologies and sensors for completing the monitoring in the Atlantic waters (WP5);
- evaluate satellite products in order to provide assistance for the MSFD descriptors such as marine litter (D10) and Biodiversity (D1);
- will explore numerical models capacities to calculate indicators and complete the areas where traditional observations and remote sensing do not reach;
- will integrate information from all the different sources to provide indicators that integrate the different data sources easing the link between science and policy making and providing state-of-the-art products to the responsible authorities.

## 3. COLLABORATION OPPORTUNITIES

The iFADO project is looking for companies that are interested in testing their developments in open waters conditions (i.e. cruises or the consortium platforms) and that will benefit from the visibility that the project will provide them to the monitoring institutions and policy-making organisations. This visibility will be reinforced through the project webpage and social media.

The project is open for other institutions/projects that are currently performing monitoring activities in the Atlantic waters in order to provide visibility to their activities and to share methodologies for indicators calculation.

The project is looking for collaboration with citizens in order to obtain more effective ways to collect data

in offshore waters by promoting the use of existing mobile apps for ocean data collection with special focus in the sailing for pleasure community. Citizens will also be approached by ocean literacy events in the five participant countries.

## 4. CONCLUSIONS

The achievement of Good Environmental Status (GES) defined in the MSFD depends strongly on the capacity of monitoring and interpreting the data obtained by several methodologies including remote sensing, *in situ* sampling and numerical modelling. Novel technologies are providing new opportunities for monitoring the vast extensions of the European Atlantic waters both in term of cost-effectiveness and emergence of new sensors.

The combination of all these elements along with the involvement of industry are the elements considered crucial for a successful implementation of the MSFD and the main motivation for the iFADO project.

### Acknowledgements

This research is a contribution for the iFADO project funded from ERDF funds of the INTERREG Atlantic Area Programme under contract EAPA\_165/2016.

### REFERENCES

Commission of the European Communities. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy. *Marine Strategy Framework Directive*.



## Multinational Response and Preparedness to Oil and Chemical Spills

L. Pinto (1), R. Fernandes (2), J. Sobrinho (1), S. Le Floch (3), R. Caldeira (4), C.C. Sánchez (5), X. Reminez (6), S. Benbrahim (7), R. Neves (1)

- (1) MARETEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal. [ligia.pinto@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ligia.pinto@tecnico.ulisboa.pt)
- (2) Bentley Systems International Ltd., Alameda dos Oceanos nº63, Escritório 3.1, 1990-208 Lisboa, Portugal
- (3) CEDRE, 715 rue Alain Colas - CS 41836, 29218 BREST Cedex 2, France
- (4) ARDITI-OOM, Edifício Madeira Tecnopolo, Piso 0, Caminho da Penteadá, 9020-105 Funchal, Portugal
- (5) ULPG, Calle Juan de Quesada, 30, 35001 Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, Spain
- (6) PLOCAN, Carretera de Taliarte,, 35214 Telde, Las Palmas, Spain
- (7) INRH, Route de Sidi Abderrahmane, Casablanca, Morocco

**Abstract:** MARPOCS was a project funded by DG-ECHO (2016-2017) that created a partnership between Spain, France, Morocco and Portugal to promote the exchange of technologies and information between the partners and the authorities of the different countries, strengthening capacity for mutual assistance and multinational preparedness and response to accidental pollution episodes. MARPOCS promoted the development of an integrated operational framework for preparedness and response to oil and HNS spills in the Atlantic sub-region involving Morocco, Madeira and Canary Islands, making it easily transferable and extendable to other areas. Its main product was an operational and tactical model-based decision support system (<http://marpocs.actionmodulers.com/>) fed by a 3D oil & HNS spill modelling system, using high resolution meteocean forecasting systems. Knowing the location, substance and amount spilled, users can simulate – on the platform – a spill’s trajectory and potential impact on land associated to the coastal sensitivity indexes developed in the frame of the project.

**Keywords:** meteocean models, transport models, HNS spill, oil spill

### 1. INTRODUCTION

The Atlantic sub-region involving Morocco, Madeira and Canary Islands (see Fig. 1) has not been as well prepared as other regions to face marine pollution caused by transnational spill accidents. Therefore, and considering the dependence of socio-economic activities on this environmental sensitive area, its marine resources and marine-based tourism, integrated strategies to address these spills are crucial. With this area as a starting point, MARPOCS promoted a common operational framework supported with state-of-the-art model-based decision support tools and exercises for oil and HNS spills, adapted to the region and supported by cross border cooperation, implementation and training of local, regional and national authorities, as planned in the Lisbon Agreement .

The need for regional cooperation in the NE Atlantic to face marine pollution has been previously demonstrated by historic accidents in Spanish, Moroccan, French and Portuguese coasts. The Lisbon Agreement, recently ratified (2014) by the mentioned countries and EU, envisions the cooperation in the case of pollution incidents. Transnational strategies to face marine pollution with hazardous and noxious substances (HNS) and especially with oil spills have been under development in different regions in the

context of international agreements and EU RTD projects. However, the sub-region in the Atlantic involving Morocco, Madeira and Canary Islands has not been similarly prepared in an integrated fashion.

Furthermore, recent oil and gas prospecting and drilling activities are increasing the awareness of potential environmental threats in this area.

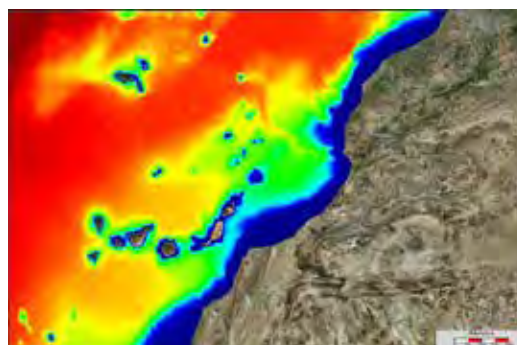


Fig. 1. The MARPOCS Atlantic sub region project área

Although spill accidents with HNS are not as frequent as oil spills, their impacts, the variety of

products (Häkkinen and Posti, 2013) and increasing volume transported (CEDRE and Transport Canada, 2012) justify the development of regional and cross border capacities to respond to both spills.

The overarching goal of MARPOCS was to develop and implement an integrated operational framework for preparedness and response to oil and HNS spills in the Atlantic sub-region involving Morocco, Madeira and Canary Islands in the context of Lisbon Agreement, making it easily transferable and extendable to other areas.

The general objective was achieved by sharing and developing common guidelines, methodologies, model-based decision support tools and exercises adapted to the regions of study, and promoted by effective implementation and training of local, regional and national authorities.

This article is divided in six sections. A briefly description of the project methodology is provided in section 2 and in section 3 the laboratory experiments conducted are described. In section 4 and 5 the potential of the MARPOCS operational platform is presented. The main conclusion are in section 6.

## 2. METHODOLOGY

Technically, the project comprised a set of actions that were responsible for collecting baseline information (e.g. Fig.2), laboratory and field measurements used to develop, calibrate and validate meteocean (e.g. Fig.3) and transport models.

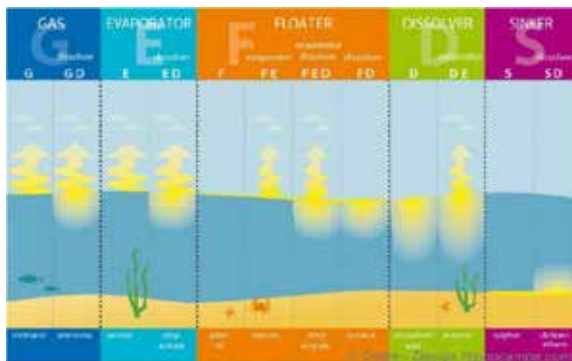


Fig.2. HNS behaviour – Processes involved.

The models results were integrated with other data sources to generate a model based decision support tool and to be used in risk assessment evaluation.

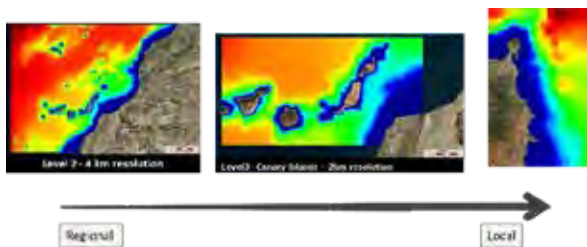


Fig.3. Canary Island model, nesting domains.

The information transfer and engagement with authorities were guaranteed with their involvement in

training courses, exercises, and local awareness raising through local road shows and hands-on sessions.

The hands-on training sessions and tabletop exercises included an assisted demonstration of the tools and its features with the possibility of having the trainees actively testing MARPOCS platform directly. This session included the following guided examples:

- maritime situational awareness: visualizing real-time information (including meteocean conditions, coastal vulnerability indices, vessel positions);
- marine environmental pollution: responding (simulating) and analysing an oil or chemical spill inside MARPOCS areas, and visualizing the fate, behaviour and potential affected areas.

A project website was designed to highlight the MARPOCS decision support tool but also to disclose the training documents produced (<http://marpocs.eu/documentation/>).

## 3. LABORATORY EXPERIMENTS

The behaviour of chemical substances can differ significantly for the wide panoply of HNS usually transported at sea. In chemical response strategy, these substances are usually classified according to their main behaviour defined in lab conditions; however, the chemical products usually combine multiple weathering processes with different kinetics, which occurred simultaneously. Laboratory experiments to quantify the behaviour of chemical products under different controlled environmental parameters were conducted in Cedre facilities (France). The results obtained from these experiments (e.g. Fig.4) provided valuable inputs to the development and calibration of the chemical spill modelling software.

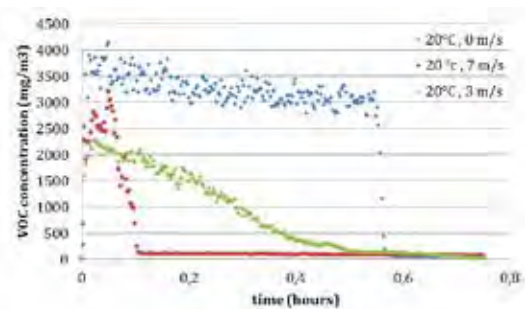


Fig.4. Atmospheric concentration of methyl isobutyl ketone at 20°C for three wind conditions (no wind, 3 m/s, 7 m/s).

## 4. MARPOCS PLATFORM

One of the goals of the project was to create a fast, user-friendly, reliable and portable interface to forecast spill behavior and impacts, for supporting tactical preparedness & response. This platform is now operational at <http://marpocs.eu/tools>.

The platform gathers for the Moroccan Atlantic Coast, Madeira and Canary Islands, meteorological and ocean model forecasts including wind, waves,

currents, field data, AIS data, and coastal sensitivity indexes.



Fig.5. MARPOCS platform interface.

This information are used to determine the risk associated to a spill near these areas, and to better allocate response resources in case of an oil or HNS spill. Depending on the spill's location, the platform will use the model with the best grid resolution available to simulate its fate.

Users can make on demand simulations of oil and HNS spills directly in the platform, without having to run them with their own resources.

#### 4.1 Coastal vulnerability indexes

Coastal vulnerability indexes were calculated for the different study areas (Madeira, Canary Islands and Agadir) and are divided into environmental, ecological and socio-economic indexes (e.g. Fig.6)

These indexes take into consideration three types of source data: Shoreline Classification based on physical and biological factors; Environmental classification evaluated by the existence of coastline protected or unprotected areas, as well as marine reserves; Socio-economic resources including demographics, industrial activities, fisheries and aquaculture, and tourism activities.



Fig.6. Tenerife island socio-economic index.

#### 4.2 Vessel information and risk

The characterization of shoreline holistic risk from spills is based in maritime traffic and other oil exploration activities in the area of interest.

MARPOCS Platform enables the visualization of real time vessel information including cargo, which is

critical to assess the risk an accidental spill would have.

## 5. ON DEMAND SIMULATIONS

Oil and HNS spills simulations can be performed at the platform with the location, substance and amount spilled provided by the user. The outputs of the simulation include a spill's trajectory and potential impact on land – association to the coastal sensitivity indexes. The tool is able to forecast the behaviour and trajectory of a spill in both water (oil spills and non-gaseous HNS) and air atmospheric contaminants (volatile HNS).

A list of known substances from NOAA ADIOS database is already included in the platform for the user to select, and end users can generate new ones as needed.

In the creation of new simulations, the user can impose the time at which a spill took place and its quantity. After the server runs the simulation, the user can see the plume's trajectory (e.g. Fig.7, Fig.8), size and percentage of the original oil/HNS mass over time, and possible affected areas.

## 6. CONCLUSION

MARPOCS platform (<http://marpocs.eu/tools>) is a fast, user-friendly, reliable and portable interface to forecast spill behaviour and impacts, supporting tactical preparedness & response to these events. The platform gathers – for the Moroccan Atlantic Coast, Madeira and Canary Islands – meteorological and ocean model forecasts including wind, waves, currents, field data, AIS data, and coastal sensitivity indexes.

Users can make simulations of oil and HNS spills directly in the platform, without having to run them with their own resources, provided they know all the relevant information. Knowing the location, substance and amount spilled, the platform is able to simulate the spills trajectory and potential impact on land – association to the coastal sensitivity indexes.

MARPOCS also promoted the exchange of technologies and information between all the partners, and between authorities of the different countries, strengthening capacity for mutual assistance and multinational preparedness and response to accidental pollution episodes in this cross-border sub-region.



Fig.7. Example of an oil spill plume trajectory.

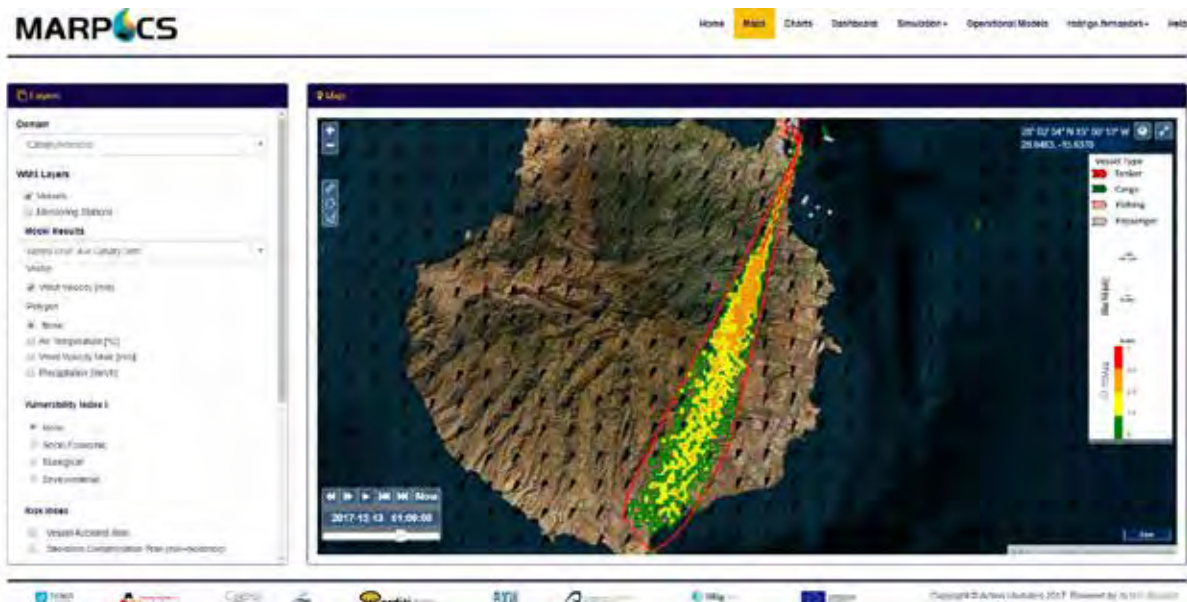


Fig.8. Example of an HNS spill plume trajectory.

## Acknowledgements

This work is sponsored by project MARPOCS co-funded by European Union (ECHO/SUB/2015/713854/PREP08), project +Atlantic co-funded by CMU-Portugal (FCT CMUPERI/TIC/0045/2014) and project MyCOAST co-funded by European Union (EAPA\_285/2016). The authors want to thank all the MARPOCS project contributors and participating institutions.

## REFERENCES

- Cedre and Transport Canada (2012). Understanding Chemical Pollution at Sea. Learning Guide. Brest: Cedre. 93p.
- Häkkinen, J.M. and A.I. Posti. (2013). Overview of Maritime Accidents Involving Chemicals Worldwide and in the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping –Marine Navigation and Safety of Sea Transportation –Weintrit & Neumann (ed.). CRC Press.

## Serviço de previsão para suporte a estabelecimentos de culturas marinhas

S. Bartolomeu (1), J. C. Leitão (1), J. Rodrigues (1), P. C. Leitão (1) e A. Silva (1)

(1) HIDROMOD, R. Rui Teles Palhinha, nº 4, 1º. 2740-278, Porto Salvo.  
[sofia.bartolomeu@hidromod.com](mailto:sofia.bartolomeu@hidromod.com)

**Resumo:** A aquacultura é um sector que tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos em Portugal. Para esta atividade, a temperatura da água representa um papel de elevada importância uma vez que se refletem na produtividade. O modelo hidrodinâmico MOHID e a metodologia de modelos encaixados tem-se revelado uma solução eficiente que permite integrar processos desde a escala dos quilómetros, como é o caso da maré, até processos da escala das centenas de metros, como plumas de estuário e rios. A partir de um modelo, operacional desde 2014 para Portugal Continental, que fornece previsões à superfície e em profundidade, modelos de alta resolução, hidrodinâmicos, tridimensionais podem ser implementados em qualquer local para reproduzir com maior detalhe os processos de alta resolução. A previsão destas condições auxilia o planeamento e gestão da quantidade de alimento necessária aos peixes, otimizando assim os recursos e minimizando os impactos no meio ambiente.

**Palavras-chave:** Aquacultura, MOHID, Temperatura da água

### 1. INTRODUÇÃO

A aquacultura apresenta um crescimento acentuado nas últimas décadas a nível global e Portugal seguiu a mesma tendência. Atualmente, a aquacultura apresenta um papel de elevada importância na sociedade moderna sendo um setor de grande interesse nacional em crescimento contínuo, cada vez mais relevante tanto na indústria alimentar como pesqueira. Esta atividade tende a combater a procura excessiva de espécies que resulta nas restrições à sua captura no habitat natural e afirma-se como uma alternativa às formas tradicionais de abastecimento de pescado. A aquacultura pode ser um complemento para diminuir parte da dependência externa referente aos produtos da pesca e ajudar a estabilizar o preço de determinadas espécies (DGPA, 2007).

De acordo com o Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa (2014-2020) (DGRM, s.d.), apesar da relativa abundância de recursos hídricos em Portugal, especialmente de águas marinhas ou salobras, as taxas de crescimento do sector estão limitadas pelas condições técnicas e/ou naturais de utilização dos recursos existentes, pelos espaços disponíveis de cultivo e pela disponibilidade de financiamentos. Este crescimento é também afetado pelo aumento estimado dos custos, nomeadamente da energia e das rações ([rea.apambinente.pt](http://rea.apambinente.pt)). Todavia, os progressos tecnológicos e a modelação numérica, assim como o avanço do conhecimento científico tendem a melhorar esta prática. Os serviços que fornecem previsões de alta resolução permitem, de forma global, a otimização do processo aliado à redução de custos.

A existência de fenómenos locais leva à necessidade de implementação de modelos de alta resolução que os consigam reproduzir com a máxima precisão possível (e.g. plumas de rios, linha de costa complexa). A temperatura da água é um dos fatores mais importante na aquacultura pois esta propriedade tem influência em todos os processos que ocorrem na água e nos peixes, uma vez que esta condiciona os processos fisiológicos dos peixes (p.ex., metabolismo, crescimento e reprodução). Quando há mudanças acentuadas de temperatura ou temperaturas que ultrapassam os limites da zona de conforto, os peixes tendem a comer menos e a baixa ingestão de alimento prejudica o metabolismo dos peixes, afetando o crescimento e o sistema imunológico (Kubitza, 1998). Consequentemente, estes impactos provocam alterações na quantidade necessária de alimento que se reflete posteriormente na gestão de recursos e custos.

Nesta publicação descreve-se uma metodologia de previsão de temperatura superficial do mar com base em modelos numéricos, deteção remota e medições de temperatura na boia ondógrafo de Sines.

### 2. METODOLOGIA

Para este estudo foram recolhidos dados de temperatura medidos pela boia ondógrafo de Sines, soluções do Copernicus - Marine Environment Monitoring Service - CMEMS (previsões: global, Iberian Biscay Irish - IBI e observações: OSTIA - L4) e previsões produzidas na HIDROMOD seguindo uma metodologia de modelos encaixados para a zona de Sines já utilizada e validada em estudos anteriores (Martins *et al.*, 2011; Leitão *et al.*, 2005 e Malhadas *et al.*, 2009).

A análise compreende o período de 1 de janeiro de 2016 a 8 de maio de 2018 (858 dias). Para o mesmo período de análise, foram ainda recolhidos dados de altura significativa da boia ondógrafo de Sines e vento meridional proveniente de um produto do CMEMS baseado em dados de satélite.

#### 2.1. Dados em tempo real

Os dados disponíveis em tempo real para a boia ondógrafo de Sines são mantidos pelo Instituto Hidrográfico. Desta fonte, foram utilizados os dados de temperatura da água e de altura significativa.

#### 2.2. Dados de satélite OSTIA (CMEMS - L4)

O sistema operacional de temperatura da superfície do mar e gelo (OSTIA) é executado pelo Met Office e produz uma análise diária de alta resolução (~5 km) da temperatura da superfície do mar para a superfície global do oceano. A reanálise do OSTIA fornece mapas diários sem falhas utilizando os dados *in situ* e os dados de satélite de radiômetros infravermelhos.

#### 2.3. Dados de vento (CMEMS-L4)

Para a superfície global do oceano, o IFREMER disponibiliza médias de seis horas de intensidade e direção do vento estimados a partir de dados recuperados dos *scatterometers* ASCAT e OSCAT e ventos de análises operacionais do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), com uma resolução horizontal de 0.25°.

#### 2.4. CMEMS global

O sistema de previsão global do CMEMS fornece diariamente previsões 3D com um horizonte temporal de dez dias e com uma resolução de 1/12°. Esta solução inclui médias mensais e diárias de temperatura, salinidade, correntes, nível do mar, profundidade da camada de mistura e propriedades de gelo para 50 níveis. Inclui ainda médias horárias à superfície de nível do mar, temperatura (utilizados no trabalho aqui descrito) e correntes.

#### 2.5. CMEMS IBI

O sistema de previsão IBI é executado diariamente pelos Puertos del Estado e fornece previsões de correntes, temperatura, salinidade e nível do mar, para os próximos cinco dias, incluindo processos de alta frequência importantes para caracterizar os processos marinhos de escala regional (como é o caso da maré, fortes variações meteorológicas, descargas de rios, entre outros). Esta solução abrange desde o norte da Islândia até às ilhas das Canárias, com uma resolução de 0.028° (Sotillo *et al.*, 2017).

#### 2.6. PCOMS 3D

O PCOMS 3D é um modelo tridimensional que, utiliza o modelo numérico MOHID e simula a circulação geral da Costa Portuguesa, é corrido em modo de previsão pelo IST (Mateus *et al.*, 2012) e pela HIDROMOD. Tem uma malha de resolução horizontal de cerca de 6 km e fornece previsões para os próximos 5.5 dias, atualizadas diariamente. A

condição de fronteira aberta é definida com base numa solução que resulta da soma linear da solução global de maré FES2012 (Carrère *et al.*, 2012) e a solução da baixa frequência CMEMS Global.

#### 2.7. MOHID – previsões de alta resolução

Quanto ao modelo de alta resolução implementado para a região de estudo, é composto por 3 níveis (MOHID 1.2 km, MOHID 250 m e 50 m) forçados na fronteira aberta por resultados a cada 900s da solução PCOMS. É um modelo 3D baroclínico, forçado à superfície por previsões do GFS, e na fronteira aberta terrestre impõem-se a descarga da pluma Térmica da EDP (40 m<sup>3</sup>/s e 10°C acima do meio recetor).

#### 2.8. Análise estatística das previsões de temperatura

Ao nível da qualidade das previsões de temperatura é importante garantir que os modelos consigam reproduzir a variabilidade observada na boia ondógrafo e nas observações de satélite. A avaliação da qualidade das previsões é feita com base no cálculo dos indicadores estatísticos:

- Erro médio (BIAS);
- Raiz do erro médio quadrático (RMSE);
- Raiz do erro médio quadrático sem BIAS (Unbias RMSE);
- Coeficiente de correlação (R);
- *Skill Score* (SKILL).

### 3. RESULTADOS

A temperatura da água registada na boia ondógrafo de Sines foi comparada com cada uma das soluções acima descritas. A análise compreende o período entre 1 de janeiro de 2016 e 8 de maio de 2018. A boia ondógrafo de Sines apresenta algumas falhas, destacando-se dois períodos com falhas superiores a dois dias: 05-13 de fevereiro de 2017 e 09 de agosto a 3 de setembro de 2017. A avaliação estatística para cada uma das soluções é mostrada na Tabela I.

Tabela I. Indicadores estatísticos para a temperatura da água para as soluções CMEMS Global, CMEMS IBI, PCOMS 3D, MOHID 250 m e MOHID 50 m: BIAS (°C), RMSE (°C), Unbias RMSE (°C), R e SKILL.

	CMEMS IBI	CMEMS Global	PCOMS 3D	MOHID 250 m	MOHID 50 m
BIAS (°C)	0.75	0.28	0.23	0.15	0.12
RMSE (°C)	1.10	0.76	0.93	0.86	0.99
Unbias RMSE (°C)	0.80	0.71	0.90	0.84	0.98
R	0.93	0.92	0.91	0.91	0.87
SKILL	0.92	0.95	0.94	0.95	0.92

A partir dos resultados obtidos para uma validação de aproximadamente dois anos e meio, verifica-se que: (1) a solução do CMEMS IBI em termos médios apresenta um valor médio superior comparativamente com as restantes soluções (BIAS de 0.75 °C); (2) a solução CMEMS Global apresenta o menor RMSE (0.76 °C) seguindo-se as soluções MOHID de alta resolução; (3) quando o RMSE é

calculado assumido o mesmo valor médio para todas as previsões (Unbias RMSE), as soluções do CMEMS Global e IBI revelam melhores resultados, seguindo-se o modelo MOHID 250 m, MOHID 50 m e por fim PCOMS 3D; (4) as melhores correlações verificam-se na solução CMEMS IBI e os melhores valores de SKILL correspondem aos CMEMS Global e MOHID 250 m (0.95).

Quando os dados da boia são comparados com os dados de satélite L4 (OSTIA), valores diários, verifica-se que as diferenças registadas são da ordem de grandeza das soluções produzidas com os modelos numéricos.

Tabela II. Indicadores estatísticos para a temperatura da água para a solução dos dados de satélite do OSTIA: BIAS (°C), RMSE (°C), Unbias RMSE (°C), R e SKILL.

	Dados Satélite OSTIA (CMEMS-L4)
BIAS (°C)	0.23
RMSE (°C)	0.64
Unbias RMSE (°C)	0.59
R	0.95
SKILL	0.97

A comparação dos dados de satélite com as medidas da boia mostra um BIAS de 0.23 °C, RMSE de 0.64 °C e uma correlação de 0.95. De acordo com os resultados obtidos, não existe uma solução numérica que seja a melhor em todos os indicadores. E, a análise detalhada das séries temporais confirma este facto. Para cada intervalo, existe uma solução que se ajusta mais às medidas, contudo, no dia seguinte a melhor solução pode ser outra. No sentido de identificar qual seria precisão máxima resultante de uma previsão que combine as cinco soluções numéricas já referidas, realizou-se uma análise das diferenças entre medidas e cada uma das soluções, utilizando as séries com uma frequência horária (a frequência dos modelos). Desta análise foi criada a série temporal que reúne, para cada instante horário, a menor diferença entre medida e previsão – BEST 1 (Fig. 1, série representada a verde). Esta série temporal é a melhor previsão possível, recorrendo a todas as soluções apresentadas. Foi ainda criada uma segunda série temporal (horária) mas que utiliza a melhor solução que apresenta a menor diferença diária – BEST 2. A análise estatística para estas séries é apresentada na Tabela III.

Em termos percentuais, 30% da série BEST 1 é composta pela solução com CMEMS Global, 21% pelo MOHID 50 m, 18% pelo PCOMS 3D e MOHID 250 m e por fim, 13% pelo CMEMS IBI. Quando se utilizam as diferenças diárias (BEST 2), a percentagem da solução CMEMS Global e PCOMS 3D aumentam e as restantes soluções diminuem. Na análise estatística, as novas soluções apresentam resultados significativamente melhores, comparado com qualquer uma das soluções anteriores. E, como seria de esperar, a série BEST 1 é ligeiramente melhor que a BEST 2.

Por fim, foi ainda criada outra série temporal que resulta da média de todas as cinco soluções para cada instante horário – MédiaTT (Tabela IV). A análise estatística desta série compósita mostra que a solução melhora em todos os indicadores (com a exceção do BIAS) quando se utiliza a média de todas as soluções comparativamente aos indicadores obtidos anteriormente na Tabela I.

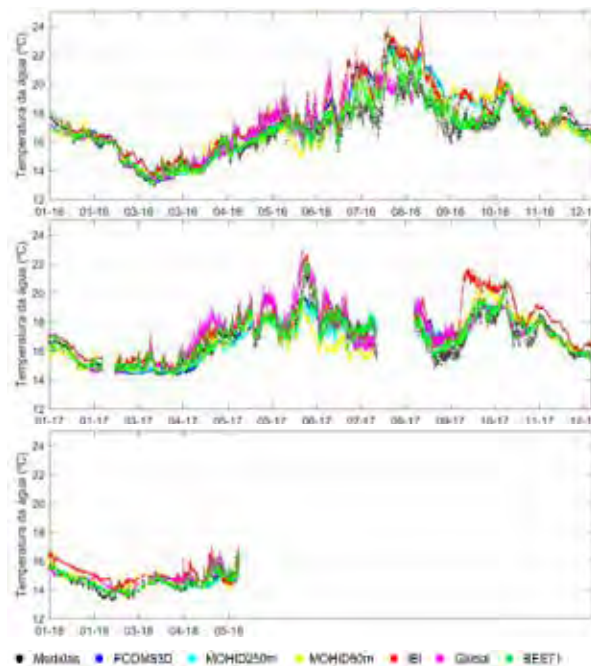


Fig. 1. Temperatura da água medida na boia ondógrafo de Sines (preto), previstas pelo MOHID PCOMS 3D (azul), MOHID 250 m (ciano), MOHID 50 m (amarelo), previstas pelo CMEMS - IBI (vermelho), CMEMS - Global (magenta) e a BEST1 (verde).

Tabela III. Percentagem de cada soluções na composição da melhor série temporal utilizando diferenças horárias e diferenças diárias.

	BEST 1 (%)	BEST 2 (%)
CMEMS IBI	13.3	11.8
CMEMS Global	30.1	33.9
MOHID PCOMS3D	18.3	20.2
MOHID 250 m	17.5	17.1
MOHID 50 m	20.8	17.0

Tabela IV. Indicadores estatísticos para a temperatura da água para as séries BEST 1, BEST 2 e MédiaTT: BIAS (°C), RMSE (°C), Unbias RMSE (°C), R e SKILL.

	BEST 1	BEST 2	MédiaTT
BIAS (°C)	0.11	0.10	0.30
RMSE (°C)	0.39	0.45	0.75
Unbias RMSE (°C)	0.37	0.44	0.69
R	0.98	0.97	0.94
SKILL	0.99	0.98	0.96

### 3.1. Proposta de uma previsão em modo operacional

Como primeiro passo foi avaliado se a precisão da solução compósita BEST 2 é uniforme ao longo do tempo ou se a sua variabilidade está de alguma forma correlacionada com a velocidade do vento meridional ou a altura significativa das ondas. Este tipo de análise permite perceber em que condições

meteo-oceanográficas o sistema de previsão tende a ter melhor precisão.

A Fig. 2 compara a média diária do erro da temperatura da série BEST 2 (linha a vermelho) com a média diária da altura significativa na boia ondógrafo de Sines (linha a azul). Nesta comparação verifica-se que os valores mais elevados do erro da temperatura ocorrem em períodos de menor altura significativa e quando o vento é predominantemente de norte (Fig. 3).

As séries temporais compósitas (BEST 1, BEST 2 e MédiaTT) revelaram resultados que nenhuma solução obteve por si só. Os próximos passos do trabalho aqui apresentado consistirá em avaliar se é possível “prever” com algum tempo de antecedência (e.g. 1 dia) qual a solução numérica (ou compósita) que melhor se ajusta às observações.

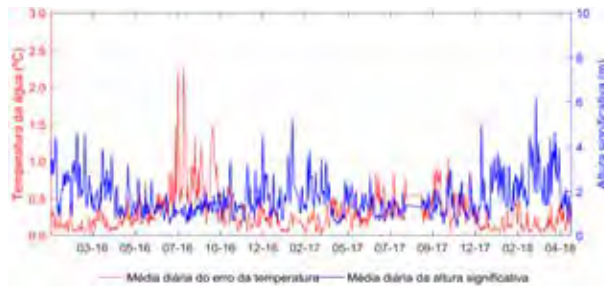


Fig. 2. Média diária do erro da temperatura da água da série BEST 2 (linha a vermelho) e média diária da altura significativa (linha a azul).

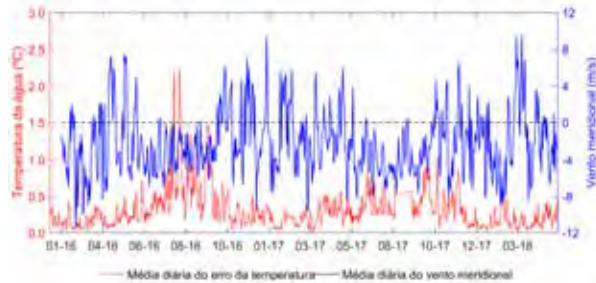


Fig. 3. Média diária do erro da temperatura da água da série BEST 2 (linha a vermelho) e média diária do vento meridional (linha a azul).

#### 4. CONCLUSÕES

As condições hidrodinâmicas, mas essencialmente, a temperatura da água, têm uma grande influência nas explorações aquícolas. A previsão da temperatura ao nível diário permite reduzir significativamente os custos de produção. A título exemplificativo, avaliou-se a capacidade das soluções numéricas operacionais CMEMS (solução Global e IBI) e MOHID (PCOMS3D, MOHID 250 m e MOHID 50 m) em prever a temperatura da água superficial em Sines utilizando dados registados na boia ondógrafo de Sines entre janeiro de 2016 e maio de 2018. Os resultados mostram que não existe uma solução numérica claramente mais precisa que as outras. A previsão que resulta de fazer uma média das cinco previsões numéricas analisadas (MédiaTT) revela ser mais precisa em termos médios que cada solução

em separado. Todavia, as soluções BEST 1 e BEST2, que identificam a melhor das cinco previsões disponíveis ao nível horário e diário respetivamente, mostram que ainda existe margem para melhorar a previsão compósita que resulte de uma combinação das previsões de base.

#### Agradecimentos

Foram utilizados os dados do Instituto Hidrográfico publicados para a boia ondógrafo de Sines.

#### REFERÊNCIAS

- Carrère L., F. Lyard, M. Cancet, A. Guillot, L. Roblou, FES2012 (2012): A new global tidal model taking taking advantage of nearly 20 years of altimetry, *Proceedings of meeting "20 Years of Altimetry"*, Venice 2012.
- DGRM, s.d. Plano estratégico para a Aquicultura Nacional (2014-2020). [http://eaquicultura.pt/wp-content/uploads/2016/02/Plano\\_Estrat%C3%A9gico\\_Aquicultura\\_2014\\_2020.pdf](http://eaquicultura.pt/wp-content/uploads/2016/02/Plano_Estrat%C3%A9gico_Aquicultura_2014_2020.pdf)
- DGPA, D.-G. d. (2007). Plano Estratégico Nacional Para A Pesca 2007-2013. Lisboa: DGPA.
- Kubitza, Fernando (1998). Qualidade da água na produção de peixes – Parte I. *Panorama da aquicultura*. Vol 8 n 45, janeiro/fevereiro 1998.
- Leitão P., Leitão J., Neves R., Berzin G., Silva A. (2004). Hydrodynamics And Transport In The Coastal Zone Of São Paulo – Brazil. *Proceedings 29th International Conference of Coastal Engineering* 3: 3316-3328.
- Malhadas Malhadas, M.S., Leitão, P.C., Silva, A., Neves, R. (2009). Effect of coastal waves on sea level in Óbidos Lagoon. *Continental Shelf Research* 29 (9), pp. 1240-1250
- Martins, F., Leitão, P.C., Silva, A., Neves, R. (2001). 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*, 24 (1), pp. 551-562.
- Mateus, M., Riflet, G., Chambel, P., Fernandes, L., Fernandes, R., Juliano, M., Campuzano, F., d e Pablo, H., Neves, R. (2012). An operational model for the West Iberian coast: products and services. *Ocean Sci.* 8 (4), 713–732.
- Sotillo M. G., Levier B. and Lorente P. (2017). Atlantic -Iberian Biscay Irish- IBI Production Centre IBI\_ANALYSIS\_FORECAST\_PHYS\_005\_001\_b. Quality Information Document. Marine Copernicus. <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf>



## Technical improvements for AUV's in SWARMS

D. A. Real-Arce (1), C. Barrera (1), T. Morales (1), J. Hernández (1) and O. Llinás (1)  
for the SWARMS consortium

- (1) Oceanic Platform of the Canary Islands -PLOCAN- Carretera de Taliarte s/n. 35214. Telde. Las Palmas. Spain – (info@plocan.eu)

**Abstract:** Underwater robotics is becoming a prominent area of knowledge due to the advantages that it offers in costly, hazardous missions that could not be done by divers in a realistic manner. In order to have a collection of autonomous and semi-autonomous vehicles cooperating though, there are several challenges to overcome, such as underwater wireless communications, information transfer at the data level, or behaviour of the vehicles during missions. The ongoing H2020-ECSEL SWARMS project is aimed to expand the use of AUVs/ROVs and facilitate the creation, planning and execution of maritime and offshore operations. The main goal of the project is to design and develop an integrated platform (a set of Software/Hardware components), incorporated into the current generation of underwater

**Key words:** AUV, unmanned vehicles, autonomous, middleware, swarms, communication, underwater, robots

### 1. INTRODUCTION

Due to the advantages they offer in regards of the optimal use of resources, the usage of robotics for maritime environments is increasing. Underwater robotics aims to combine the unique features present in several kinds of vehicles, such as Autonomous Underwater Vehicles (AUVs), Remotely Operated Vehicles (ROVs) or Unmanned Surface Vehicles (USVs) in order to have a complete set of devices and services that can be used in missions that require monitoring or maintenance of complex maritime infrastructures, like oil platforms, underwater pipes of artificial subsea berms. SWARMS (Smart and Networking Underwater Robots in Cooperation Meshes) research project targets to expand the use of all these autonomous and semi-autonomous vehicles and robotic implementations, which will also be supported by USVs, to facilitate the creation, planning and efficient execution of maritime and offshore missions (SWARMS, 2018). However, in order to achieve a seamless integration of all the facilities that these autonomous vehicles can provide, the following open issues must be solved to an extent:

1) Wireless communications between the different hardware elements deployed when a mission has to be carried out present several open issues: the integration of regular, wireless communications that use already established technologies such as WiMAX and 802.11 standards, with underwater, acoustic waves that hardly have any standard that can be used is problematic.

2) Device interoperability has to be guaranteed for successful data exchanges in the underwater environment. Vehicles belong to different vendors with different features regarding data formats, hardware capabilities or software development

policies, so it is likely that when deployed together in a mission, they will not be able to understand each other regarding the data sent and received. The way to solve this challenge is by including a software layer that abstracts all hardware heterogeneity and provides the upper, more application-based layers with a collection of homogeneous-looking set of services that can be used by them. This layer, commonly known as middleware (Díaz H.D., *et al*, 2013), will be able to provide and Application Programming Interface that will be accessed by the application layer.

3) In order to offer a complete set of functionalities, software services must be included in the architecture used to transfer data among the different entities deployed in the system. Semantic features of the data transmitted and received, context awareness, Quality of Service or even securitization of the information are major topics to take into account in data transfers.

4) The characteristics that deal with mission management and development must also be tackled when deploying the autonomous vehicles. Temporal planning becomes a major feature to be considered, especially when the environment envisioned to be used by these vehicles is often unpredictable and prone to unforeseen events (Bernardini, S. *et al* 2017).

The following sections explain how the SWARMS project tackles the above mentioned issues to build a reliable and consistent solution.

### 2. THE SWARMS ARCHITECTURE

The SWARMS project proposes an integrated system that has three main functional components:

1) Mission Management Tool (MMT): it is located inside the Command and Control Station (CCS), and

is responsible for generation of missions, assign tasks to robots, and supervision of the mission. It contains the Human Computer Interface (HCI), which permits the human operator to interact with the system.

2) Middleware Core: ensures the communication between the MMT and all the underwater and overwater vehicles, regardless of type, manufacturer, and capabilities, using buoys/USVs as communication nodes. Therefore, it is not by itself a stand-alone physical component and is distributed by nature in various locations (e.g. in the CCS located on vessel or onshore, as shown in Fig. 1, and on robots). However, due to its specific role, it is a stand-alone logical component that ensures that all the robots are able to understand the Command and Control Station, in order to coordinate amongst themselves, etc.

3) Robot System Onboard Architecture (RSOA): allows to interface between robots such as AUVs, ROVs, USVs, and Middleware. It also contains specific modules developed in the SWARMS project that enable a robot to interact and to execute the high level commands provided by the MMT using the Middleware Core. All these robots are represented in the MMT as external resources and can receive specific tasks within a mission through the Middleware.



Fig. 1. The main components of a SWARMS scenario. Command and Control Station can be allocated on shore or on ship.

Fig. 1 depicts the communication and main physical components involved in a typical SWARMS scenario. It is important to separate the physical components (such as the Command and Control Station, AUVs, ROVs, USVs, buoys and other communication elements) from the functional/logical components defined in this document (MMT, Middleware, Robot System Onboard Architecture). As can be seen, the MMT, which is a functional component, can reside on the command and control vessel, but it can also reside in a building if the Command and Control Station is on-shore.

Fig. 2 shows the functional and physical components of the architecture diagram and focuses on a) the components of the Middleware System which highlights the distribution of the Middleware System across the different SWARMS physical components to ensure the collaboration between robots. In the figure these are the CCSS, AUV/USV, ROV, Buoy,

Satellite, etc. b) the distribution of the Middleware System subcomponents which are in the CCSS, the communication system and the vehicles, c) the connection between the Robot Systems, with proprietary interfaces (HW/SW solutions for controlling the robot) and the Middleware Core using an onboard controller built by the manufacturer.

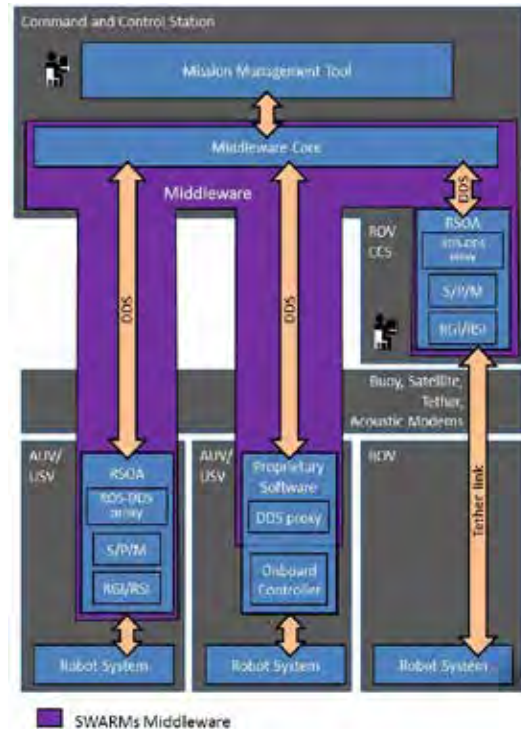


Fig. 2. Functional and physical components of architecture diagram.

### 3. COMMUNICATIONS

The sea is a strong and challenging environment for communication systems, both in air and underwater, reflecting both RF and acoustic incident waves, causing diffraction and absorption effects and increasing the ambient noise among others. For both surface and underwater regions, the transmission can be subjected to limited range, interruptions and loss of data because of frequency interferences and noise disturbances.

As has been said in previous sections, communications play a crucial role in the SWARMS project. The management of a heterogeneous mix of underwater vehicles needs a robust communication network, which must be able to transfer context information among platforms to allow vehicles cooperation, as well as motion and tasks planning adaptation according to mission goals and platforms safety rules.

The configuration of the communication network working in SWARMS maritime scenarios, shown in Fig. 3, is composed by:

- The RF surface/overwater sub network composed by: a) RF long/medium range wireless point-to-

point link. The architecture is designed to extend the data transfer as an alternative of used UHF/VHF OTH and satellite solutions. b) A short range Wi-Fi using adapted commercial solutions, allowing star topology and point to multipoint links.

- A medium frequency (MF) underwater acoustic sub network, used to transfer small data packets at medium/long distance, with low bit rate. Different configurations (Star topology, Point-to-point (P2P) – single hop, P2P – multi-hop, flooding with specific protocols to improve efficiency) can be adopted.
- A high frequency (HF), short-range underwater acoustic sub network is used to transfer larger packets at high bit rate (e.g. video streaming, HQ images, sonar data) using a P2P link between two robotic vehicles or a robotic vehicle and a surface access point.

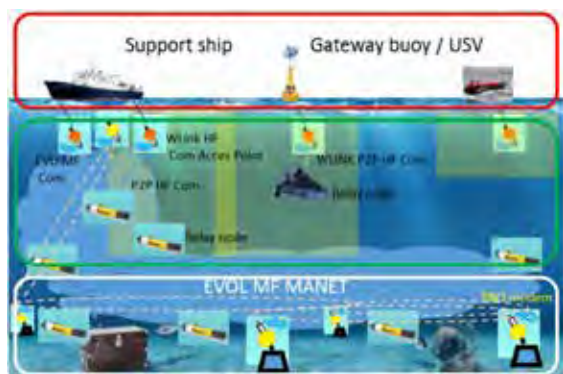


Fig. 3. Full underwater network architecture

#### 4. SWARMS DEMONSTRATIONS

During the life of the project several field integrations and demonstrations have been performed in order to test and proof the technical developments.

The first stage of field trials and demonstrations planned in the SWARMS project was held during the last weeks of September 2016. These Early Trials took place at PLOCAN facilities in Gran Canaria island (Spain) with a duration of 10 days of exhaustive proofs of concepts and validations of the technical developments made during the first year of the project. Fig 4 shows the Alister9 during a deployment in PLOCAN.

To test and demonstrate the different achievements of the first stages of the project, seven missions were planned and executed in parallel. These missions were essentially split according to the respective domains and involved technologies, i.e. Environmental sensing, Communication, Simulation and Middleware.<sup>3</sup>

In order to address the needs of the seven missions of the SWARMS Early Trials, different assets and technical equipment (boats, autonomous vehicles, acoustic modems, RF radiolink systems) were

moved and installed to PLOCAN test facilities. These maneuvers were held in three different scenarios: PLOCAN land facilities for the computer simulation, antennas installation, water tank testing and control center, PLOCAN pier and harbour for the overwater and underwater communication tests, and PLOCAN offshore test site for communications and environmental recognition missions.



Fig. 4. ECA Alister9 at PLOCAN Test Site during the Early Trials

In those early stages of the Project, some of the features of the systems were running on a simulator. In order to select a proper simulator, a benchmark over the existing solutions was performed resulting in the decision of using a new underwater robotics simulator that would fulfill the requirements of the SWARMS project: the UUV Simulator (N. Koenig, et al., 2004).

This simulation package contains the necessary plugins that adapt Gazebo Robotics Simulator (Applegate *et al.*, 2011) for underwater robotics, including ROS-based (Robot Operating System) applications such as controllers and teleoperation nodes that allow the operation of the simulated vehicles.

The vehicle models adapted and integrated in Gazebo, Fig. 5, all run a plugin to compute hydrodynamic and hydrostatic forces in real-time through the implementation of Fossen's equation of motion (T.I. Fossen, 2011) with the Gazebo API. Thrusters and fins can be setup using the manufacturer's specifications, such as lift and drag coefficients and the steady-state curves describing the relationship between the thruster's state variable and the output thrust force.

After the success of this first set of trials, the first release of the SWARMS system was demonstrated in Mangalia, Romania at the Black Sea, in July 2017.

The scope of this demonstration was to integrate different vehicles in the SWARMS architecture, using the communication network to share data in real time through DDS/MW and sending commands to the vehicles according to the mission evolution.

The objective was to characterize the H<sub>2</sub>S concentration in the area of Mangalia harbour

(outside or inside) and to map sea bottom to check the status of the sea life. To cover these goals four missions were accomplished during 10 days that led to a success of the process, and the detection of some system weaknesses that needed to be fixed before the final demonstrator.



Fig. 5. SWARMS Vehicles presented in the Gazebo simulation environment [RexROV (upper left), IXN AUV by IXION (upper right), SAGA ROV by Desistek (left), Naiad by MDH (bottom) and A9 AUV by ECA (bottom right)].



Fig. 6. PLOCANs BlueROV at UPTEC-POLO facilities during the Porto integration.

In order to improve the results achieved after the first system demo, and test the latest project outcomes before the final demonstration in Trondheim, Norway, some integration tests were performed during the last week of April 2018. This integration week was held in the Leixões Port, in Matosinhos, Portugal, at the POLO-UPTEC facilities. During these tests some key modifications were done to the vehicles hardware and software, and several complete missions were successfully launched. The BlueRov2 from PLOCAN took part in these activities as shows Fig. 6.

## 5. CONCLUSIONS

The fruitful collaboration among partners participating in the project produced a high quality set of results aligned with the SWARMS objectives defined for the Field Validation milestone. These results were directly related to the effective testing of devices or technological developments carried out during the project.

A plethora of useful information was collected during each of the intensive field demonstrations, not only in terms of data but also concerning integration and testing procedures, as well as good

practices, to be further exploited in the final project validation at Trondheim, Norway.

With regards to the environmental conditions, the project will have to consider the differences between the demonstrators. Specifically, temperatures in Norway will be different from those encountered during the early trials (average air temperature  $\sim -1^{\circ}\text{C}$ , average water temperature  $\sim +5^{\circ}\text{C}$ ) as well as light (average sunlight time per day is  $\sim 4$  hours and 30 minutes). These challenging conditions can reduce the ability to perform outdoors tests and can have an impact on equipment (e.g. battery autonomy).

## Acknowledgements

The research leading to the presented results has been undertaken within the SWARMS European project (Smart and Networking Underwater Robots in Cooperation Meshes), under Grant Agreement n. 662107-SWARMS-ECSEL-2014-1, which is partially supported by the ECSEL JU and the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (Ref: PCIN-2014-022-C02-02), and the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT: ECSEL/0002/2014; ECSEL/0003/2014).

## REFERENCES

- SWARMS (Smart and Networking Underwater Robots in Cooperation Meshes) research project. (ECSEL project number: 662107). Accessed 11th May 2018. Available: <http://swarms.eu/>.
- Díaz, H.D.; Ortega, J.F.M.; García, A.C.; Rodríguez-Molina, J.; Cifuentes, G.R.; Jara, A. (2013). Semantic as an Interoperability Enabler in Internet of Things. *In Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*; River Publishers: Aalborg, Denmark.
- Bernardini, S., Fox, M. & Long, D. (2017). "Combining temporal planning with probabilistic reasoning for autonomous surveillance missions". *Autonomous Robots*, 41: 181.
- N. Koenig and Howard, A. (2004). "Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan.
- Applegate, David L., et al. (2011). *The traveling salesman problem: a computational study*. Princeton university press.
- T. I. Fossen (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, John Wiley & Sons.

## Improving monitoring capabilities in the Macaronesian region with ocean gliders

C. Barrera (1), R. Caldeira (2), C. Waldmann (3), M.J. Rueda (1), J. Hernández (1) and O. Llinás (1)

- (1) Oceanic Platform of the Canary Islands -PLOCAN- Carretera de Taliarte s/n. 35214. Telde. Las Palmas. Spain – (info@plocan.eu)
- (2) Observatorio Oceanico da Madeira -OOM. Funchal. Madeira. Portugal.
- (3) Center for Marine Environmental Sciences -MARUM-. Bremen. Germany.

**Abstract:** The Macaronesia is a vast area playing a key role in the East boundary of the Central North-Atlantic ocean-circulation system. Despite a significant research activity in ocean monitoring for decades using a wide range of observing systems and methodologies, the area is still under-sampled, mainly due access and coverage constrains, as well as the observation sustainability. Ocean gliders offer a new approach in terms of capacity and sustainability, allowing undertake ocean-monitoring in spatiotemporal scales hitherto unavailable. The present work shows preliminary results from the latest mission with buoyancy-driven and surface ocean gliders in the area, whose main goal focuses on to improve and expand ocean observation capabilities strengthening glider endurance lines between archipelagos, as part of the global ocean-observation strategy conducted by the Marine & Maritime Network (R3M), as contributing party aligned with the European and international efforts in the North Atlantic basin.

**Key words:** Ocean, monitoring, glider, Macaronesia, robotics, marine, technology

### 1. INTRODUCTION

In-situ ocean monitoring is still difficult and costly for a large number of chief reasons, despite current advances on key marine technology fields. Oceans have a complex 3D-structure and their behavior is governed by a wide variety of processes. Long-term monitoring of them also poses substantial technical and logistic challenges. World oceans are constantly shifting in ways that impact on every face of our society. To keep open-ocean and coastal communities, economies, and ecosystems healthy requires to monitor key physical, chemical, and biological parameters to assess how these areas (offshore and coastal, from surface to seafloor) are changing in order to take the right decisions for them and the environment.

The Group on Earth Observations, GEO, is coordinating efforts to build a Global Earth Observation System of Systems, or GEOSS. GEO was launched in response to calls for action by the 2002 World Summit on Sustainable Development and by the G8 (Group of Eight) leading industrialized countries. These high-level meetings recognized that international collaboration is essential for exploiting the growing potential of Earth observations to support decision making in an increasingly complex and environmentally stressed world.

GEO has released GEOSS on the basis of a 10-Year Implementation Plan for the period 2005 to 2015 in order to define a vision statement for GEOSS, its purpose and scope, expected benefits, and the nine

“Societal Benefit Areas” of disasters, health, energy, climate, water, weather, ecosystems, agriculture and biodiversity. GEO is coordinating efforts to build a Global Earth Observation System of Systems, or GEOSS. GOOS (Global Ocean Observing System) is the oceanographic component of GEOSS (Dexter et al, 2010; Lampitt *et al*, 2009)

### 2. THE ATLANTOS PROJECT

AtlantOS is a project supported by the European Union’s Horizon-2020 research and innovation programme, under the Call BG-8 Developing in-situ Atlantic Ocean Observations for a better management and sustainable exploitation of the maritime resources (AtlantOS Project). It is a 4-year project, with a budget of 21 M€ involving 62 partners from 18 countries (13 EU and 5 non-EU), plus supporters. The overarching objective of AtlantOS is to achieve a transition from a loosely-coordinated set of existing ocean observing activities to a sustainable, efficient and fit-for-purpose Integrated Atlantic Ocean Observing System (IAOOS) by defining requirements and systems design, improving the readiness of observing networks and data systems, and engaging stakeholders around the Atlantic; and leaving a legacy and strengthened contribution to the Global Ocean Observing System (GOOS) and the Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) (Lampitt *et al*, 2009).

The project is organized along work packages: i) observing system requirements and design studies, ii) enhancement of ship-based and autonomous

observing networks, iii) interfaces with coastal ocean observing systems, iv) integration of regional observing systems, v) cross-cutting issues and emerging networks, vi) data flow and data integration, vii) societal benefits from observing/information systems, and viii) system evaluation and resource sustainability.

Engagement with wider stakeholders including end-users of Atlantic Ocean observation products and services will also be key throughout the project. The AtlantOS initiative contributes to achieving the aims of the Galway Statement on Atlantic Ocean Cooperation signed in 2013 by the EU, Canada and the US, launching a Transatlantic Ocean Research Alliance to enhance collaboration to better understand the Atlantic Ocean and sustainably manage and use its resources.

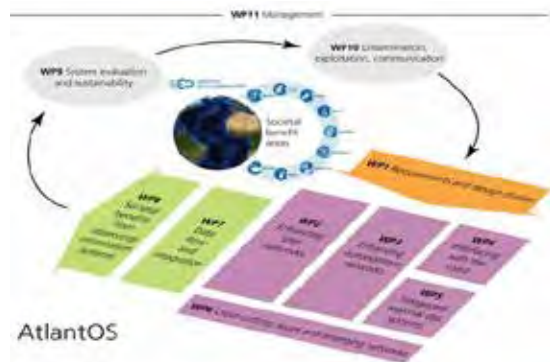


Fig. 1. AtlantOS project architecture and work flow.

The operational approach of AtlantOS includes a specific chapter (WP3 – Enhancing autonomous networks) related to ocean glider, as cutting-edge technology for a most sustainable and cost-effective ocean-observation capacity (Fig 1).

### 2.1. The role of PLOCAN in AtlantOS

PLOCAN, the Oceanic Platform of the Canary Islands (Rudnick et al, 2004) is a Spanish multipurpose technical-scientific service infrastructure, suited by a set of large facilities that provide support to research, technological development and innovation in the ocean. The aim of PLOCAN is to build an infrastructure to promote marine science and technology of excellence and facilitate access to ocean areas while always safeguarding the environment. PLOCAN is a joint initiative of the Government of the Autonomous Region of the Canary Islands and the Spanish National Government (Ministry of Science and Innovation). PLOCAN's main role in AtlantOS refers to ocean-observation activities in the East-Central North-Atlantic area by the use of different autonomous and ship-based technologies, with special focus at ESTOC (European Station of Time-Series in the Ocean–Canary Islands). In order to accomplish the goals according to the task along the different work-packages, a wide range of ocean-

platforms are used, being one of them ocean-gliders from the glider-fleet owned by PLOCAN.

### 2.2. Ocean-glider technology

Ocean-gliders technology represents a new operational step in regards autonomous monitoring of physical and biochemical seawater parameters at surface and across the water column [4]. Buoyancy-driven (underwater) and surface-vehicles (ASV) are the two main families of ocean-gliders nowadays available and widely used by for different purposes. Underwater gliders (Fig. 2) are autonomous vehicles that profile vertically by controlling buoyancy. By the other hand, ASV are platforms able to gather energy from the ocean (mainly wind of wave power) as motion-source. Gliders propel themselves by changing buoyancy and using wings to produce forward motion. Buoyancy is changed by varying the vehicle volume typically by O (100 cc) to create a buoyancy force of about 1 N. Wing lift balances the across-track buoyant force while the forward buoyant force balances drag. The ratio of horizontal speed O (25 cm/s) to vertical speed (glide slope) equals lift over drag and is typically 2 to 4, much less than for an aeronautical glider. Energy for gliding is supplied at the bottom of each dive cycle where work is performed to increase vehicle volume. On an O (1 km) deep-dive cycle lasting several hours, the O (10 kJ) energy used to change buoyancy implies a power usage for propulsion of about 0.5W. The saw-tooth flight-paths of gliders naturally sample the ocean both vertically and horizontally.

In both cases, profilers and surface technologies are open platforms able to carry on different sensor payload configurations, according to end-user needs, being the two main limitations: power and size/weight ratio. Water temperature, conductivity, dissolved oxygen, pigments, turbidity, nutrients, ocean-currents and meteorological are some examples of oceanographic parameters able to be monitored by these cutting-edge autonomous ocean-platforms.

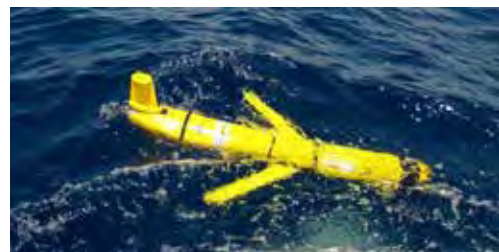


Fig. 2. Buoyancy-driven glider technology example (Slocum G2. Teledyne Marine).

Buoyancy-driven and ASV gliders have become since some years ago part of the wide-range of ocean-platforms addressed to monitor the area of interest for PLOCAN and partners across the East-Central North Atlantic, as technical approach of the R3M -Maronesia Marine and Maritime Network-

regional monitoring strategy in support to the main international ocean-observations programs and initiatives.

### 3. THE R3M

The Macaronesia region is a wide ocean area with more than 5.5 millions Km<sup>2</sup> located in the East-Central North Atlantic that comprises four main archipelagos: Açores, Madeira, Canary Islands and Cape Verde (Fig. 3). All them clearly show a common volcanic (hotspot) origin which gives them similarities concerning biodiversity, although there is a climate variation due to their latitudinal distribution. The status of outermost region, the land fragmentation of each archipelago in islands as bounded units and the external dependence, are structural features that have conditioned and decisively influenced the development of human activities and the availability of resources. Despite this, Macaronesia has a clear and strategic international interest for all major socio-economic sectors within the marine maritime fields, which require information as derived product from the marine environment observations in a continuous and efficient way.

The R3M (Macaronesia Marine and Maritime Network) is a regional (linked globally) initiative aimed to increase the quantity and quality of marine environment observations across its four main archipelagos in order to understand and predict both the phenomena that take place on it and the related environmental and socioeconomic impact (Barrera *et al.*, 2013). The R3M is an integrative and synergic tool, making compatible and accessible to potential end-users (commercial and recreational navigation, harbors, safety & security, oil & gas, aquaculture, wastewater, tourism, marine research, water sports, ocean energies, protected areas, weather agencies, national and regional governments, etc.) all the marine environment observations [time series observations gathered by different “in-situ” and remote sensing platforms from cutting-edge and conventional methodologies], regardless of the institution or company that carry them out.

### 4. THE LATEST PERFORMED MISSIONS

**A. MADEIRA-CANARIES TRANSECT** - This glider mission was conducted and led by PLOCAN as part of its tasks committed within AtlantOS project work plan. The Instituto Hidrografico (IH) of Lisbon and the Madeira’s Ocean Observatory (OOM) joined the mission as partners from the operational, scientific and strategic point of view in the Macaronesian context. The main goal of the mission was to evaluate cooperation capabilities between the abovementioned partners, looking for a permanent glider-endurance line between Madeira and Gran Canaria, as well as to identify new oceanographic features from water masses and associated processes from a high-frequency

sampling tool as it represents such type of autonomous platform, in comparison to the ship-based techniques used up to know as most common methodology for ocean observation in this area.

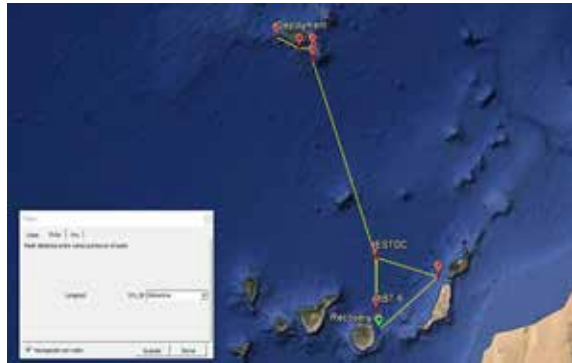


Fig. 3. Full glider path described across the mission.

A Slocum G2 glider owned by PLOCAN with a dedicated sensor-payload configuration (CTD, dissolved oxygen, turbidity and chlorophyll) was shipped to Madeira, and deployed southwards Funchal from the Portuguese Navy’s “NRP-Zaire” with the support of a Madeira’s SAR rubber-boat. The nearly 1000 kilometers of glider-path between launching to recovery locations was divided in three areas (Fig. 3). An initial segment crossing the Island of Madeira, a second segment from Madeira to ESTOC site and the third and final one was conducted between Gran Canaria and Fuerteventura Islands (Fig. 4). Piloting tasks were conducted from PLOCAN premises and data display was available along the mission through the glider portal web-tool. Additional data and modeling supporting piloting tasks were provided by OOM.

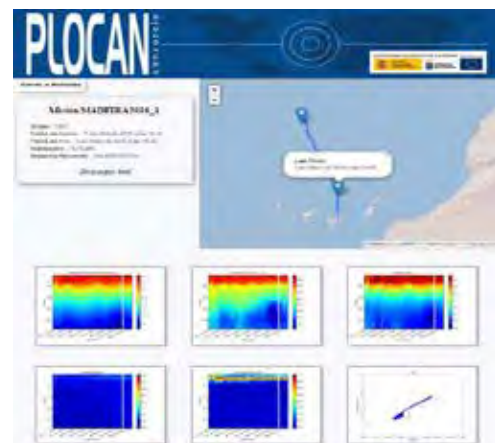


Fig. 4. PLOCAN glider portal tool.

After 26 days of mission, the glider was successfully recovered northwards Gran Canaria from Spanish-Armada’s “Metoro” patrol-boat (Fig. 5).

Satellite derived observations including SSH and SLA from AVISO, SST from GHRSSST, Ocean Surface Currents derived from satellite altimeter and Scatterometer data (OSCAR), monthly averages of Chlorophyll-a from MODIS-Aqua, NCEP wind and wave forecast using WAVEWATCH III, and forcing

winds from GFS have been used as product-tool. MERCATOR-IBI36 hydrodynamic regional model forecast based on NEMO application updated daily to plot SSH, SST, SSS, ocean current vectors over flow speed (Fig. 6).



Fig. 5. Glider recovery maneuver from "Meteoro" patrol-boat.

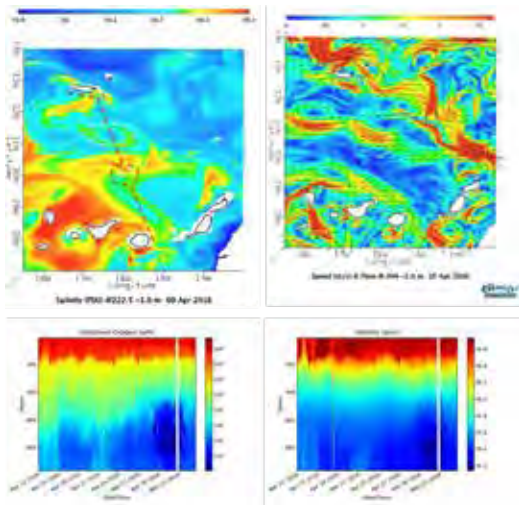


Fig.6 . Derived product-tools and preliminar derived results.

B. MSM61 – Oceanographic cruise MSM61 aboard the German research vessel RV/Maria S. Merian to study the physical and bio-geo-chemical characterization of the outstanding ecosystem of the Senghor Sea Mount located Northwards Cape Verde Archipelago, and to assess the operational response and capability of new, autonomous oceanic observation technologies in real operational scenarios. The study is part of AtlantOS and includes deploying and operating a range of autonomous observation equipment and platforms, such as multi-parameter modules anchored in the water column and on the seabed, autonomous surface marine vehicles (gliders) - SV2 and SV3 Wave Gliders - and profilers (Slocum G2-1000), all fitted with specific sensor equipment for taking samples and data in-situ, in response the scientific and technical needs and objectives set for the mission and the project (fig. 7).



Fig. 7. Mission path, Wave Glider unit and MSM deck view.

C. CHALLENGER MISSION – The Challenger One is an international program initiative where PLOCAN cooperates with Teledyne Marine and Rutgers University in regards a Slocum G2 glider unit, under the name of Silbo, that attempts to circumnavigate the North Atlantic basin, for scientific and technological purposes. Deployed in Ireland in May 2017, after 178 days of navigation across the Macaronesia, Silbo reached Gran Canaria on November 2017, where is expected a maintenance and battery replacement before to be re-deployed (Fig. 8). Glider data from the Challenger Mission is flowing to Global Telecom System and is being assimilated by European and American global ocean forecast models. Glider data has been use to assess the predictive skill between the American and European operational global ocean forecast models.



Fig.8 .Silbo after recovery and path described in this leg.

#### Acknowledgements

The research leading to the presented results has been undertaken within the AtlantOS European project (Optimising and Enhancing the Integrated Atlantic Ocean Observing Systems), under Grant Agreement n. 633211 – European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program.

#### REFERENCES

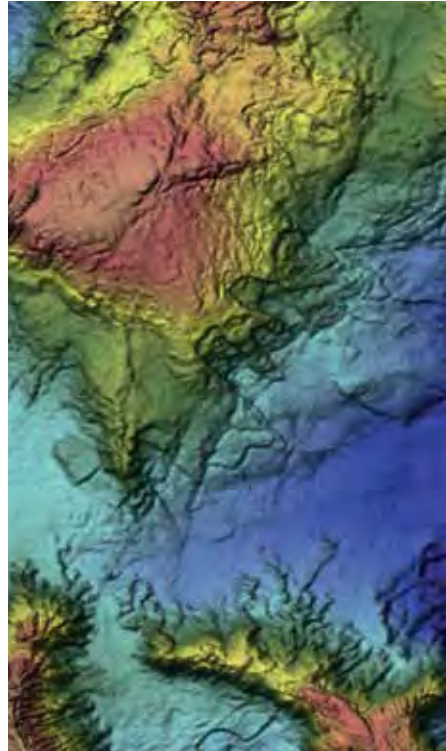
- Dexter, P., and Summerhayes, C.P.,(2010). "Ocean Observations: the Global Ocean Observing System (GOOS)". Chapter 11 in Pugh, D., and Holland, G., (eds.), *Troubled Waters: Ocean Science and Governance*. CUP, Cambridge, pp. 161-178. May 2010.
- Lampitt, R., and Favali, P., (2009). "In situ Sustained Eulerian Observatories", *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*. Venice, Italy, ESA Publication WPP-30, 21-25 Sept. 2009
- AtlantOS Project: <https://www.atlantos-h2020.eu/>
- Rudnick, D. *et al.* (2004). "Underwater Gliders for Ocean Research". *Marine Technology Journal*. Vol. 38, 1, pp. 48-59. June 2004.
- Barrera, C. *et al.*,(2013). "Highlights from latest sea-operations in the Macaronesia region with unmanned autonomous marine gliding vehicles". *Proceedings of the OCEANS'13 IEEE/MTS Conference*. Bergen. Norway. ISBN 978-1-4799-0000-8, pp. 1-7. June 2013.





# OCEANOGRAFIA FÍSICA

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA





# Estudo de correntes e massas de água no espaço marítimo português: Utilização de software e de climatologia

N. Nogueira Marques (1), C. Lopes da Costa (2)

(1) NRP “João Roby”, Marinha, nadia.nogueira.marques@marinha.pt

(2) Escola Naval e CINAV, Marinha, carlos.lopes.costa@marinha.pt

**Resumo:** No espaço marítimo português muitos são os fenómenos que caracterizam as águas que aqui se apresentam: fenómenos locais como a *Mediterranean Outflow Water* ou a Corrente e Contra Corrente dos Açores, ou fenómenos mais abrangentes como o giro subtropical. A análise das características térmicas, salinas, e consequente velocidade do som e densidade destas águas permite-nos compreender melhor o seu comportamento no espaço geográfico. Neste estudo é abordado, a partir de software desenvolvido e com dados o mais atualizados possível, de modo a conseguir-se uma perspetiva visual dos diferentes tipos de massas de água e respetiva circulação.

**Palavras-chave:** *Mediterranean Outflow Water*, Corrente dos Açores, Base de dados

## 1. INTRODUÇÃO

A área geográfica do espaço marítimo português, do ponto de vista oceanográfico, pode ser caracterizada pela sua dinâmica de correntes, massas de água diversas e consequentes fenómenos hidrológicos como vórtices de mesoscala. As correntes marítimas de circulação geral desta zona estão associadas à parte nordeste do giro subtropical, englobando correntes como a Corrente da Deriva do Atlântico Norte e a Corrente de Portugal ou das Canárias. Associado também a estas correntes, estão as alterações provocadas pelo fluxo de saída e entrada da água no Mar Mediterrâneo que consequentemente influenciam todo o comportamento das massas de água da periferia. Procura-se encontrar essas estruturas com base em climatologia e software criado.

## 2. DISTRIBUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA

### 2.1. *Mediterranean Outflow Water*

As características que mais se destacam no Atlântico Norte subtropical são as propriedades de termoclina bem acentuadas em elevado grau de salinidade e temperatura, sendo a sua causa proveniente da “língua salina” do Mediterrâneo (Bower *et al.*, 2002). A água superficial que provém do Oceano Atlântico e que progressivamente vai entrando no Mar Mediterrâneo começa a sofrer sucessivas transformações quanto à sua composição. Segundo Kinder e Bryden (1987), apud Bozec (2011), no Mar Mediterrâneo, está registado uma evaporação de cerca de 60 cm/ano o que leva à produção de uma água com cerca de mais 2,1 ups, ou seja uma água mais salina e mais densa. É no Estreito de Gibraltar que é observável uma saída de fluxo de água Mediterrânica (MOW), sendo que esta por ser mais densa em comparação com a água do Oceano

Atlântico, em seu redor, desce até aos cerca de 1000 m de profundidade do talude continental, na parte leste do Golfo de Cádiz (Figura 1).

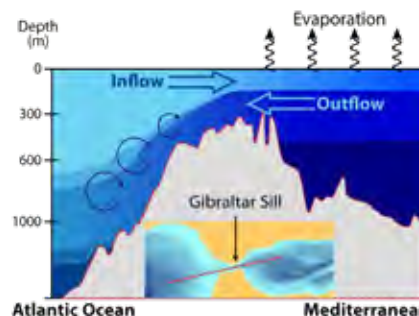


Fig. 1. Representação do processo de entrada (inflow) e saída (outflow) de água no Mar Mediterrâneo. Imagem extraída de <http://www.euroargo-edu.org/floatdata.php?float=6900701>

Ao tentar perceber como é o comportamento desta MOW ao longo da costa portuguesa, foram encontrados alguns impedimentos físicos, nomeadamente a existência de lentes salinas anticiclónicas (McDowell e Rossby *et al.*, 1978, apud Bower, 2002). Estes coerentes e energéticos vórtices, mais conhecidos por *meddies*, contêm grandes quantidades de água vinda do *outflow* de Gibraltar, distinguindo-se pelo seu conteúdo quente e salgado, até 1 ups e 4,0°C maiores que o seu ambiente envolvente.

A MOW depois de atingir a sua flutuação neutra, perto dos 008°W, acaba por ser intensificada pela Corrente de Vertente, ou subcorrente do Mediterrâneo. Esta corrente, perto do Cabo de São Vicente, segue para norte e continua ao longo do talude continental, sendo o seu transporte provavelmente até ao *Porcupine Bank* (50°N), a oeste da Irlanda.

### 2.2. *Corrente e Contra Corrente dos Açores*

A CA (Corrente dos Açores) constitui um ramo da Corrente do Golfo e dirige-se para sudeste até à Crista Dorsal Atlântica, a cerca de 34°N e 37°N, a sudoeste dos Açores (Kase e Siedler, 1982; Gould, 1985, apud Volkov 2010). Segundo Paillet e Mercier (1997) apud Kida (2007), à medida que a CA se aproxima da fronteira leste, esta bifurca: um ramo para sul que acaba por se juntar à Corrente das Canárias, e outro ramo que flui até ao Golfo de Cádiz, estando em investigação a sua extensão desde a *Newfoundland Rise*.

O transporte para leste do Atlântico Norte, entre 32° e 35°N, realizado pela CA é observado em cerca de 10-12 Sv, sendo a sua maioria concentrado na camada dos 1000 metros superiores do oceano e realizando velocidades que excedem os 10 cm/s (Gould, 1985; Sy, 1988; Stramma e Muller, 1989; Pingree *et al.*, 1999, apud Volkov, 2010). Fluindo no sentido contrário, para oeste, e a norte da CA, entre 37° e 38°N, Onken (1993), apud Kida (2007), foi o primeiro a sugerir a existência de outra corrente zonal, a Contra Corrente dos Açores (CCA), com um transporte de 2 a 8 Sv e bem pronunciada na camada de 0-800 metros. Stramma e Muller (1989), apud Kida (2007) observaram um máximo de velocidade para a CCA de 7 cm/s. Alguns estudos indicam que existe uma dependência entre esta e o Mar Mediterrâneo, relacionado também com o conceito de dinâmica das plumas  $\beta$  introduzida por Stommel (1982), apud Volkov (2010). Ainda segundo L. da Costa (2016), acredita-se que o mecanismo da pluma  $\beta$ , associado à CA e à CCA, começa por ser uma pluma  $\beta$  topográfica ao longo do talude no nordeste do Golfo de Cádiz que, com o atrito turbulento horizontal, por exemplo associado aos *meddies*, se estende para o largo e para oeste do Cabo de São Vicente, deixando a batimetria de controlar a pluma, passando esta a ser controlada pelo gradiente de vorticidade planetária.

### 2.3. Dinâmica costeira de Portugal Continental

O sistema de corrente que existe no espaço marítimo envolvente de Portugal Continental é pouco definido espacialmente devido a interações entre a costa e as correntes a uma grande escala, a topografia dos fundos oceânicos e as massas de água, contudo, Perez *et al.* (2001) e Martins *et al.* (2002), apud Aguiar (2011), consideram que este sistema estende-se desde os 36°N até aos 46°N de latitude, e desde as costas ibéricas até aos 024°W de longitude. Este sistema de correntes é sustentado principalmente pela zona do giro subtropical, e é compreendido pela Corrente e Contra Corrente de Portugal, mais conhecida por Corrente de Vertente, sendo o seu limite norte a Corrente do Atlântico Norte, e o seu limite sul a CA.

Aqui a salinidade e a temperatura, nos 100 m mais superficiais, variam respetivamente entre 35,8-36,0 ups e entre os 14,0°-19,0°C, dependendo do domínio da água de *upwelling* (mais fria) ou do *downwelling* (mais quente).

## 3. DADOS E PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL

Os dados de temperatura e salinidade adquiridos permitiram uma análise e interpretação de resultados de diferentes perspetivas. A salinidade (ups) tem um papel influente na densidade das massas de água, sendo que a densidade aumenta com os aumentos da salinidade e da pressão, e diminui com o aumento da temperatura. A densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) é uma variável de extrema importância por estar relacionada com a força que causa a circulação interna no oceano, por influenciar as forças de flutuação e movimentos verticais e as forças de gradientes de pressão horizontais e movimentos horizontais. A temperatura (°C) nas camadas superiores do oceano, até aos 500-1000 m de profundidade, nas latitudes baixas e médias, é o parâmetro que mais influencia a densidade. Quanto à velocidade de propagação da energia acústica (m/s), esta varia pouco com a salinidade sendo que os efeitos da temperatura e pressão podem ser mais relevantes.

Para este estudo foi optado pela utilização do *software* Matlab para interpretação gráfica. A área que foi escolhida para este estudo está compreendida entre as latitudes 30°N e 45°N e as longitudes 005°W e 040°W, e quanto aos dados estes foram extraídos da *World Ocean Database 2013* (WOD13) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) por ser considerado um dos maiores arquivos de dados climáticos.

## 4. INTERPRETAÇÃO GRÁFICA

Os primeiros gráficos têm como finalidade a análise geral do panorama dentro da área de investigação, tendo sido calculada a média, máximo e mínimo das quatro variáveis em estudo, à medida que a profundidade aumenta.

Analisando a Figura 2.a), são destacáveis as alterações dos valores máximos do sinal térmico entre os 700 e 1500 m a variar entre os 13,0° e 5,0°C, com evidências de um máximo relativo aos 1400 m. Quanto à Figura 2.b), a variável da salinidade máxima sofre uma variação entre os 550 e os 1500 m com valores a variar entre 36,2 - 35,3 g/kg, mas com um máximo relativo na profundidade de 1200 m com 36,6 g/kg, evidenciando a presença da MOW. A conclusão retirada da interpretação destes valores, é que a MOW tem presença desde os 600 aos 1500 m, estando o seu núcleo compreendido entre os 1100 e os 1300 m de profundidade.

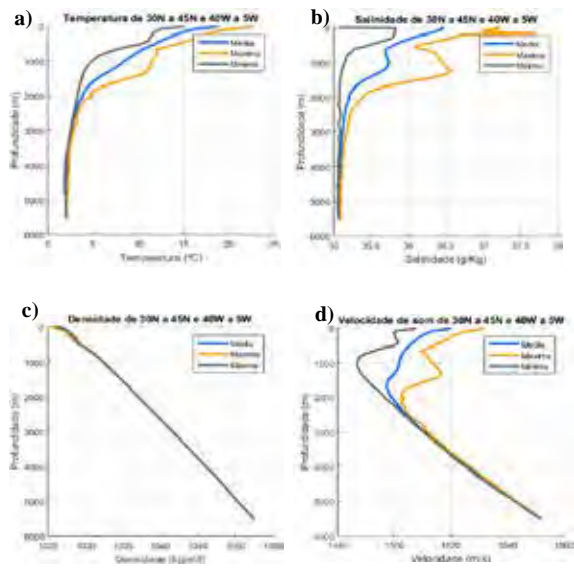


Fig. 2. Resultados gráficos do programa em Matlab produzido, onde são representadas as médias, máximos e mínimos das variáveis temperatura e salinidade compreendidas na área de investigação.

Relativamente à Figura 2.c) é notório uma continuidade praticamente linear no traçado das densidades achando-se as águas menos densas sobrepostas às mais densas. Na Figura 2.d) como consequência das alterações de temperatura e salinidade vistas acima, acaba também por sofrer variações no seu comportamento sobressaindo dois canais de som (centrados nos mínimos relativos de velocidade do som): o superior entre os 500 e 1200 m com um mínimo relativo de 1509 m/s aos 650 m, e o inferior entre os 1200 e 3100 m com mínimo relativo de 1502 m/s aos 2000 m.

Uma análise por imersão foi também efetuada, permitindo deste modo uma avaliação horizontal das massas de água ao longo da longitude e latitude.

No que diz respeito às Figuras 3.a) e 3.b) são visíveis elevados gradientes N/S, variando entre os valores de 15,5°-22,0°C à superfície e 13,0°-19,0°C aos 100 m, sendo notória a presença de menores temperaturas a norte e ao longo da costa portuguesa, facto que pode ser justificado pelo fenómeno de *upwelling* - ascensão de águas profundas, mais frias. Ainda nestes níveis de profundidade é possível verificar baixos gradientes E/W a norte, que aumentam bastante a sul e sudeste.

Quanto à Figura 3.c), podemos constatar que ambos os gradientes (N/S e E/W) diminuem, justificado pelo facto de a esta profundidade já não existir tanta influência dos agentes meteorológicos ou termodinâmicos da superfície. A temperatura nesta imersão varia entre 11,0°C a norte e nordeste, e 13,5°C a sudoeste da área.

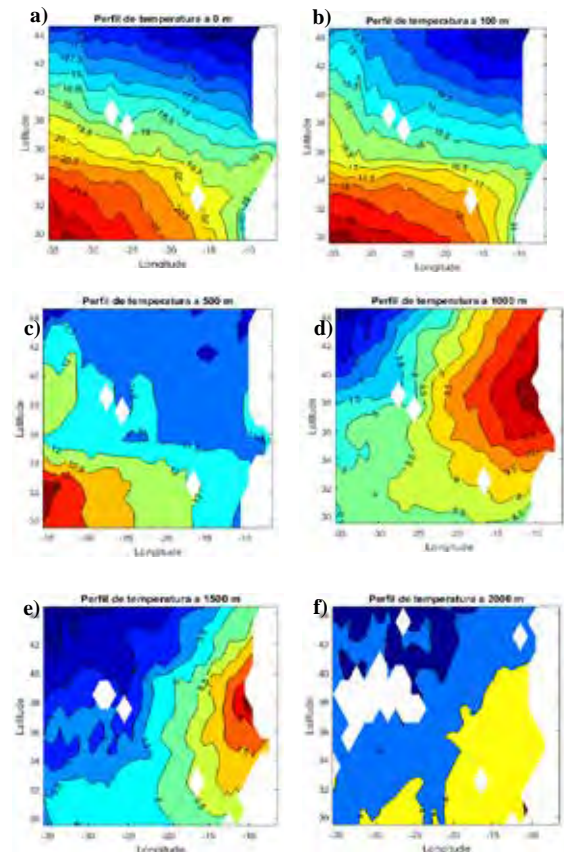


Fig. 3. Resultados gráficos do programa em Matlab produzido, compreendidos na área de investigação. Distribuição de temperaturas (°C) nas profundidades: 0, 100, 500, 1000, 1500 e 2000 m.

Na Figura 3.d) dá-se um aumento de temperatura para os 11,0°C perto de costa que se estende para norte para além dos 45°N, e para oeste com destacável presença até aos 025°W, com 8,0°C. Quanto à Figura 3.e) já se nota um desvanecimento do sinal térmico, com 8°C na costa, que se desvanecem até aos 020°W com 6,0°C. Este comportamento de temperatura é indício da MOW.

A evolução da característica térmica, dos 1000 m para os 1500 m, ajuda na conclusão que o núcleo da MOW se situa mais próximo dos 1000 m e não tanto dos 1500 m, dando forças à afirmação de que este núcleo se mantém entre os 1100 m e os 1300 m.

Com a análise dos gráficos anteriores é perceptível, de um modo geral, as componentes de estratificação da coluna de água ao longo da profundidade. De modo a termos uma completa noção do comportamento das massas de água foram calculadas e analisadas as correntes geostóficas, nas componentes N/S e E/W.

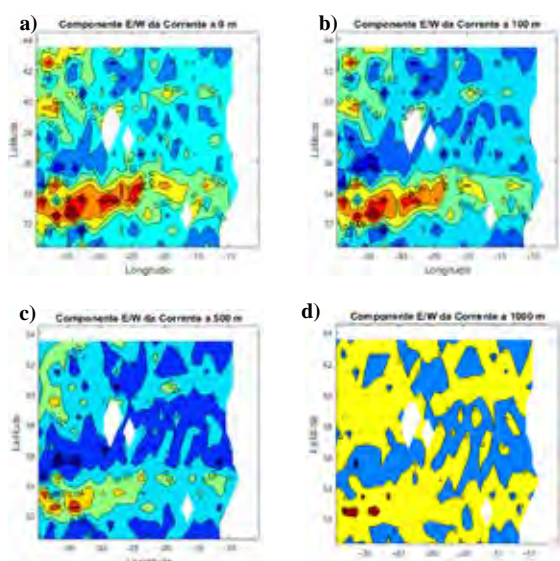


Fig.4. Resultados gráficos do programa em Matlab produzido. Análise da corrente geostrófica na componente E/W, ao longo da área da investigação, nas diferentes camadas de imersão: superfície, 100 m, 500 m e 1000 m de profundidade.

Quanto à componente N/S, tanto à superfície como ao longo da profundidade é difícil perceber se existe alguma coerência e consistência quanto à sua direção. No entanto, quanto à componente E/W, já é claramente perceptível quais as estruturas das correntes e direções predominantes nesta área. Na Figura 4.a), entre as latitudes 32°-35°N com direção para leste e com valores que chegam a atingir os 0,1 m/s nas longitudes 32°-35°W, sendo o seu sinal desvanecido com a aproximação à zona costeira, encontra-se o que parece ser a CA. Quanto à Figura 4.b) podemos constatar uma diminuição do sinal da CA para valores de 0,08 m/s entre os 028°-035°W, sendo que aqui já se pode notar a presença de uma corrente contrária à CA, a norte desta e com direção oeste, a CCA.

Na Figura 4.c), é pequeno o sinal de presença da CA, no entanto já está bastante bem delineado o contorno da CCA compreendido entre as latitudes 35°-37°N.

## 5. CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo foi-se constatando, com o auxílio gráfico, que a principal massa de água presente nesta área de estudo, é a MOW, dando a este local as suas características térmicas e salinas. Para além desta, a CA, bifurcando da Corrente do Golfo, e a CCA são bem nítidas e relevantes na dinâmica oceânica. Já a Corrente de Portugal ou Canárias e a Corrente da Vertente não são nítidas nos gráficos do cálculo geostrófico a partir dos dados.

### Agradecimentos

Agradece-se à Escola Naval por proporcionar atividades de investigação como esta.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar, A. C. Barbora *et al.* (2011), “Zonal structure of the mean flow and eddies in the Azores Current System”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, Azores, pp. 53 a 67.
- Bower, Amy S, AMBAR, Isabel, SERRA, Nuno (2002), “Structure of the Mediterranean Undercurrent and Mediterranean Water spreading around the southwestern Iberian Peninsula”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, Massachusetts, pp. 3 a 19.
- Bozec, Alexandra *et al.* (2011), “On the variability of the Mediterranean Outflow Water in the North Atlantic from 1948 to 2006”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, Florida, pp. 1 a 18.
- Kida, Shinichiro, PRICE, James F., YANG, Jiayan (2007), “The Upper-Oceanic Response to Overflows: A Mechanism for the Azores Current”, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 38, Massachusetts, pp. 880 a 894.
- Lopes da Costa, C. (2016), “Mecanismo da pluma  $\beta$  e a sua aplicação o sistema da Corrente e Contracorrente dos Açores”, *Actas das 4ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 21 a 23 de Junho de 2016, Instituto Hidrográfico, Almada, ESCOLA NAVAL, pp. 133 a 136.
- Volkov, Denis L. (2010), “On the reasons for the formation and variability of the Azores Current”, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 40, Boston, pp. 2197 a 2220.

## Assessment of sea surface temperature estimates near the coast off SW Portugal

P.B. Oliveira (1), M. Santos (1,2), T. Moita (1,3), A. Amorim (2)

- (1) IPMA, Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 1495-165 Algés. pboliveira@ipma.pt  
 (2) MARE/FCUL - Campo Grande, 1749-016 Lisboa  
 (3) CCMAR - Univ. Algarve, Campus de Gambelas, 8000-139 Faro

**Abstract:** The sea surface temperature (SST) is one of the most readily available ocean parameters and a wealth of global-to-regional SST products is currently available through various archive centers and services. Faced with the various data sources, the user is usually challenged with the problem of deciding which product is the best for his application and study region. In this work, we use in situ temperatures, measured from June 2014 to October 2017 at 3m depth one mile off the coast, to validate satellite-derived, analysed, and modeled SST data off SW Portugal (Lagos). The comparison shows that all tested datasets, namely those used in numerical ocean model assimilation schemes, failed to reproduce surface cooling events. During the 3-years observation period, the strongest biases were observed in summer (July-Aug) 2014 and 2015, when the in situ temperatures were more than 3°C below the various products during long upwelling events (>10 day).

**Key words:** coastal temperature, coastal upwelling, moored instruments, operational oceanography, Algarve

### 1. INTRODUCTION

The sea surface temperature (SST) is one of the most readily available ocean parameter with global coverage. It is also among the first ocean parameters operationally retrieved from satellite remote sensing, making key contributions to operational oceanography, numerical weather prediction, climate studies and other applications. Currently, a wide number of SST products are available through various archive and distribution centers. Most of these data are produced and distributed according to standards, agreed in the frame of GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature). This group was established to foster an international focus and coordination for the development and generation of global, multi-sensor, high-resolution near real time SST products. In addition to the operational service, GHRSSST aims to support and develop best practice in the development of Climate Data Records (CDR) of SST, an Essential Climate Variable (ECV) for global change studies. It also strives to ensure SST data product continuity with dedicated sub-groups on SST research issues, on data formats and data stewardship, and on user interaction (Donlon et al., 2009; Kaiser-Weiss & Minnett, 2012).

Given the large number of global-to-regional SST products, that are currently available through various archive centers and services, the user is usually faced with the problem of deciding which product is the best for his application and study region.

In this work, we use data from continuous in situ subsurface temperature to assess a suite of SST

products and operational model solutions available through the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). In the following sections the results from the comparison of various SST products are presented and discussed.

### 2. DATA AND METHODS

*In situ* temperature was measured using self-recording thermistors, moored at 3m depth under a navigational buoy located at the limit of an offshore aquaculture area, at about 2 km off coast, SW Portugal (Fig.1). The temperature data has been collected since June 2014 with a sampling interval between 5 and 10 min. Data is recovered during maintenance visits to the site, when the thermistor is physically removed from the mooring and either replaced or re-deployed in less than an hour. The results presented here refer to daily averages in the period from June 2014 to October 2017.

The SST data were primarily obtained from CMEMS, but also from JPL-PODAAC (Jet Propulsion Laboratory Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), namely the repository of GDS2 (GHRSSST Data Processing Specification v2) (GHRSSST Science Team, 2010) compliant products, the NOAA National Centers for Environmental Information (NOAA NCEI), and EUMETSAT's Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI-SAF).

Data for the study region (36-38°N, 10-7.5W) and observation period were extracted in NetCDF (Rew & Davis, 1990) from their original sources either by using service APIs (Application Programming



Interface, e.g. the motu\_client provided by CMEMS) or using *ncks* from NCO tools (Zender, 2008). NetCDF subsets were created from OSI-SAF data downloaded from IFREMER FTP server, as well as data from PODAAC and NCEI provided via TDS (THREDDS Data Server - Thematic Real-time Environmental Distributed Data Services) (Unidata, 2018). Local NetCDF subsets for each product were analysed using Ferret tool (Hankin et al., 1996). SST time series were extracted from the various subsets by selecting the grid-point closest to the location of the moored thermistor (cf. Fig.1). For the full-period graphical representations (Fig. 2), the daily time-series were low-pass filtered with a cut-off period of 30 days.

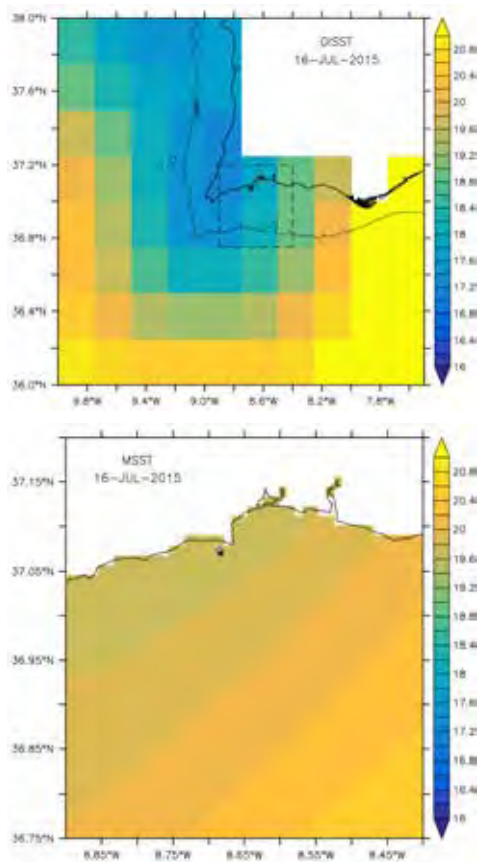


Fig. 1. SST map for 16-JUL-2015 from two analysis products: Optimum Interpolation - NOAA (top) and JPL-PODAAC MUR SST - (bottom). Dashed box on top panel indicates the area presented in the bottom panel. The location of the in situ measurements is marked with  $\star$ . Nearby symbols indicate the center of the closest grid point from the SST products.

Five SST products (SSTp) were selected to illustrate the variability patterns in the study site: three satellite-based products with increasing spatial resolution - NOAA NCEI Optimum Interpolation at  $1/4^\circ$  (OI, Reynolds et al., 2007; Banzon et al., 2016), UKMO OSTIA at  $1/20^\circ$  (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis, Donlon et al., 2012, Martin et al., 2016) and JPL-PODAAC MUR

SST at  $1/100^\circ$  (Chin et al., 2017); and two model-based products: CMEMS IBI Ocean Analysis and Forecasting system at  $1/36^\circ$  (IBIa) and CMEMS IBI Ocean Reanalysis system at  $1/12^\circ$  (IBIr) (Sotillo et al., 2015).

### 3. RESULTS

The in situ subsurface measurements (iSST) taken near-coast off Lagos, from June 2014 to October 2017 (Fig. 2, top, black), show a clear seasonal cycle. Minimum temperatures, close to  $15^\circ\text{C}$ , were registered in February/March and yearly maximum values, up to  $25^\circ\text{C}$ , on a broader time range - from June (eg. 2015) to late September (eg. 2014).

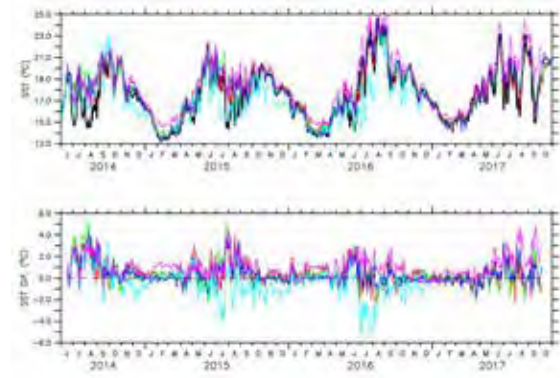


Fig. 2. Top: full period (Jun-2014: Oct-2017) low-pass filtered time-series of in situ temperature (iSST, black) and five SST products (color): NOAA NCEI Optimum Interpolation (OI, red), OSTIA (green) and MUR SST (blue); model-based CMEMS products: IBI Ocean Analysis (IBIa, purple) and IBI Ocean Reanalysis (IBIr, light blue). Bottom: temperature difference between the SST products and the in situ measurements (SSTp - in situ).

Summer temperatures (June to October) exhibit much higher temporal variability than the seasonal cooling, from October to February, and the seasonal warming, from February to June. The summer period is characterized by sharp cooling events when the temperature drops as much as  $4\text{--}5^\circ\text{C}$  in just a few days ( $< 5$ , eg. early July 2014, late July 2015, mid September 2016 and 2017). All SST products (Fig.2, color) show the same seasonal temperature cycles, with similar values ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) in winter time. With the exception of IBIr (light blue), large positive differences between SSTp and iSST are observed in the summer, during the periods of sharp iSST temperature decrease (Fig. 1, bottom).

Previous works (e.g. Relvas & Barton, 2002) have shown that summer SST in the study site is primarily driven by alternating events of warm westward coastal currents and eastward advection of cold upwelled water from the nearby Cape S. Vicente (cf. Fig.1, top). The iSST time series for summer 2015 (Fig. 3) illustrates a 23-day event (23 July - 15 August) with a  $4^\circ\text{C}$  drop in 6 days ( $19^\circ$  to  $15^\circ\text{C}$ ), followed by a 9-day increase, when the temperature returned to the initial value. The amplitude of this cooling event is not captured by any of the SST

products which showed much less variation, maintaining relatively high values. This leads to SSTp - iSST differences close to 5°C when iSST reach the lowest values (OSTIA and IBI SSTa). With the exception of IBI SSTr, all products show a positive bias exceeding 2°C (OISST) or 3°C (OSTIA, IBI SSTa and MUR) for more than 10 days.

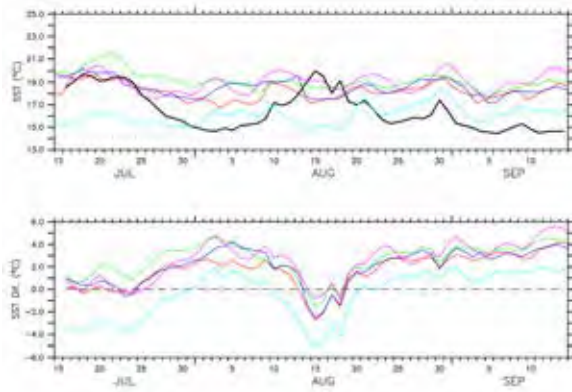


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for summer 2015 (15 Jul to 15 Sep, not low-pass filtered)

#### 4. DISCUSSION AND CONCLUSION

The results presented here demonstrate that current satellite-based SST products show significant positive biases on a coastal location for periods on the order of 10 days. This has impact on the solutions of the ocean analysis and forecast systems assimilating the optimally interpolated SST products. These results reinforce the recommendation for improvement in the retrieval SST in complex coastal regions as stated in OceanObs09 white paper (Donlon et al., 2010). Interestingly, thermistors moored on coastal buoys, like the one used here, are not listed in the four priority types of instruments/platforms identified in GHRSSST “Strategic Aim II - Expand Validation Framework”, which are drifting buoys, ARGO profilers, ship-borne underway hull thermometry and ship-based radiometers (Kaiser-Weiss & Minnett, 2012). It is likely that a secondary role is given to the moored buoy network due to the necessary limited coverage and the high maintenance costs. Although not usable for operational, near-real time evaluations, this study shows that self recording thermistors moored on existing signaling buoys are a cost-effective solution to gather near-surface temperature data, to assess the performance of SST products on the coastal zone.

Analysed (OI) SST products, strongly relying on satellite data, are used to provide boundary conditions for atmospheric circulation models and are assimilated in operational ocean circulation models, with reported general model improvements (e.g. Chao et al., 2017). The OSTIA product is

particularly relevant in this respect because it is used operationally as a boundary condition for all weather forecast models at the Met Office and at European Centre for Medium-range Weather Forecasting (ECMWF) and assimilated in the CMEMS Operational Mercator global ocean analysis and forecast system (Lellouche et al., 2018) which, in turn, is currently used as boundary condition in the IBI run. Despite the reported mean bias from 0 to 0.06 and an accuracy from 0.57 to 0.4 K (Donlon et al., 2012, McLaren et al., 2016), our results show that the biases can be significantly different in coastal regions and periods of about 10 days. It is therefore important to maintain regular assessments of the SST products in the coastal regions. This will ensure that best quality data are used on the assimilation schemes and prevent the use of biased SST analysis that may have a negative impact on the performance of the numerical models.

#### Acknowledgements

Mariana Santos is supported by FCT through a doctoral grant SFRH/BD/52560/2014, within the EarthSystems Doctoral Program of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon and strategic project UID/MAR/04292/2013. The financial support from CCMAR (Plurianual UID/Multi/04326/2013) is also gratefully acknowledged.

This study has been conducted using E.U. Copernicus Marine Service Information available from <http://marine.copernicus.eu/>. The Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) data were obtained from the NOAA National Centers for Environmental Information at <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>. The data from the EUMETSAT Satellite Application Facility on Ocean & Sea Ice used in this study are accessible through the SAF's homepage <http://www.osi-saf.org>. The authors wish to acknowledge the use of the Ferret, a product of NOAA's Pacific Marine Environmental Laboratory (<http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/>).

Thanks are due to the company Testa e Cunhas (<http://testacunhas.com/>), particularly to Eng. A.M. Cunha, for the logistic support on the work at sea.

#### REFERENCES

- Banzon, V., T.M. Smith, T.M. Chin, C. Liu, and W. Hankins (2016). A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 165–176, <http://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016>
- Chao, Y., J.D. Farrara, H. Zhang, K.J. Armenta, L. Centurioni, F. Chavez, J.B. Girton, D. Rudnick, R.K. Walter (2017). Development, implementation, and validation of a California coastal ocean modeling, data assimilation, and forecasting system, *Deep Sea Research Part II*:

- Topical Studies in Oceanography*, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.04.013>
- Chin T.M., Vazquez J., Armstrong E. (2017). A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 200: 154-169, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>
- Donlon, C. & Co-Authors (2010). "Successes and Challenges for the Modern Sea Surface Temperature Observing System" in *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, <http://doi.org/10.5270/OceanObs09.cwp.24>
- Donlon, C.J., K.S. Casey, I.S. Robinson, C.L. Gentemann, R.W. Reynolds, I. Barton, O. Arino, J. Stark, N. Rayner, P. LeBorgne, D. Poulter, J. Vazquez-Cuervo, E. Armstrong, H. Beggs, D. Llewellyn-Jones, P.J. Minnett, C.J. Merchant, and R. Evans (2009). The GODAE High-Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project. *Oceanography* 22(3):34-45, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.64>
- Donlon, C. J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., and Wimmer, W. (2012). The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sens. Environ.* 116,140-158, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
- GHRSSST Science Team (2010), The Recommended GHRSSST Data Specification (GDS) 2.0, document revision 4, available from the GHRSSST International Project Office, 2011, pp 123. <https://www.ghrsst.org/wp-content/uploads/2016/10/GDS20r5.pdf>
- Hankin, S., Harrison, D.E., Osborne, J., Davison, J. and O'Brien, K. (1996). A Strategy and a Tool, Ferret, for Closely Integrated Visualization and Analysis. *The Journal of Visualization and Computer Animation* 7, 149-157. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1778\(199607\)7:3%3C149::AID-VIS148%3E3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1778(199607)7:3%3C149::AID-VIS148%3E3.0.CO;2-X)
- Lellouche, J.-M. & Co-Authors (2018). Recent updates on the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high resolution system. *Ocean Science Discussions*. 1-70, <https://doi.org/10.5194/os-2018-15>
- Kaiser-Weiss, A. and P. Minnett (2012). GHRSSST Strategy an Implementation Plan (GDIP), <https://www.ghrsst.org/wp-content/uploads/2016/10/GHRSSST-GDIP-2012-2022.pdf>
- Martin, M. E. Fiedler, J. Roberts-Jones, Ed Blockley, A. McLaren, S. Good (2016). Product User Manual for OSTIA Near Real Time Level 4 SST products over the global ocean, <http://cmems-resources.cls.fr/documents/PUM/CMEMS-OSI-PUM-010-001.pdf>
- McLaren A., E. Fiedler, J. Roberts-Jones, M. Martin, C. Mao, S. Good (2016). Quality Information Document Global Ocean OSTIA Near Real Time Level 4 Sea Surface Temperature Product. <http://cmems-resources.cls.fr/documents/QUID/CMEMS-OSI-QUID-010-001.pdf>
- Rew, R. K. and G. P. Davis (1990). NetCDF: An Interface for Scientific Data Access. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 10, 76-82. <https://doi.org/10.1109/38.56302>
- Relvas, P., and E. D. Barton (2002). Mesoscale patterns in the Cape São Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region, *Journal of Geophysical Research*, 107(C10), 3164, <https://doi.org/10.1029/2000JC000456>
- Reynolds, R.W., & Co-Authors (2007). Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473-5496, <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>
- Sotillo M G, S. Cailleau, P. Lorente, B. Levier, R. Aznar, G. Reffray, A. Amo-Baladrón, J. Chanut, M. Benkiran E. Alvarez-Fanjul (2015): The MyOcean IBI Ocean Forecast and Reanalysis Systems: operational products and roadmap to the future Copernicus Service, *Journal of Operational Oceanography*, <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1014663>
- Unidata, 2018: THREDDS Data Server (TDS) [software]. Boulder, CO: UCAR/Unidata Program Center. <https://doi.org/10.5065/D6N014KG>
- Zender, C. S. (2008), Analysis of Self-describing Gridded Geoscience Data with netCDF Operators (NCO), *Environ. Modell. Softw.*, 23(10),1338-1342, <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.03.004>

## Geração de Maré Interna na Cadeia Vitória-Trindade

Simone S. B. Camargo <sup>(1)</sup> e Afonso M. Paiva <sup>(1)</sup>

(1) Programa de Engenharia Oceânica COPPE/UFRJ. Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 209 – Cidade Universitária, Ilha do Fundão. Rio de Janeiro – RJ, Brasil. Contato: sbarem@gmail.com.

**Resumo:** A complexa batimetria da Cadeia Vitória-Trindade (CVT) insere-se como barreira física para a dinâmica oceânica da região, contribuindo para geração de maré interna, mistura vertical e ressurgências. A análise de dados altimétricos e resultados numéricos demonstram que a CVT representa um expressivo local de geração de maré interna no Atlântico Sudoeste. Essas ondas internas, na frequência da componente  $M_2$ , irradiam a partir da cadeia para altas e baixas latitudes. A geometria em forma de arco, determina o aparecimento de um ponto focal localizado a 160 km ao sul da CVT. A assinatura em superfície destas ondas é de 2-3 cm (dados e modelo), enquanto que oscilações do campo de temperatura podem atingir dezenas de metros na região da termoclina. O fluxo de energia para componentes semidiurnas é significativo, com máximos de 4 kW/m, da mesma ordem dos valores calculados nos principais locais de geração de maré interna no globo.

**Palavras-chave:** Ondas Internas, Maré Baroclínica, Cadeia Vitória-Trindade.

### 1. INTRODUÇÃO

A onda de maré barotrópica, ao se propagar em regiões estratificadas e de forte gradiente batimétrico, interage com a topografia local distorcendo os campos de massa do oceano. Os gradientes de pressão baroclínicos geram ondas internas na frequência de maré, a maré interna ou maré baroclínica (Craig, 1987). Uma fração significativa da energia da maré barotrópica (aproximadamente 1/3) é dissipada no oceano aberto pela conversão à maré baroclínica, principalmente próximo a regiões com feições topográficas como cadeias e ilhas (Egbert e Ray, 2000). A transferência de energia da maré barotrópica para maré baroclínica nessas regiões afeta o balanço de energia no oceano (Powell *et al.*, 2012), podendo ser importante para determinar padrões de circulação do oceano, o transporte de calor e sal e, portanto, o clima (Munk e Wunsch, 1998). Os fluxos energéticos associados à maré interna podem influenciar a mistura, o transporte de sedimentos, a produtividade biológica e as variações temporais e espaciais das correntes (Pereira e Castro, 2007). Além disso, as excursões verticais e horizontais associadas com a maré interna podem ser suficientes para contribuir para fluxos de nutrientes significativos sobre feições topográficas como taludes, cordilheiras e ilhas oceânicas (Vargas-Yáñez *et al.*, 2002).

Marés baroclínicas tem sido observadas em diversas regiões do mundo, a partir de sua assinatura em superfície no sinal altimétrico ou diretamente em dados *in situ*. As ilhas do Havaí (Ray e Mitchum, 1996) e o Estreito de Luzon, no Mar do Sul da China (Alford *et al.*, 2015) são algumas das regiões mais energéticas em termos de geração destas ondas.

Simulações numéricas (Simmons *et al.*, 2004) indicam que cerca de 75% da conversão global de energia da maré barotrópica para a maré baroclínica ocorre em 20 locais de grande variação topográfica. Estes autores sugerem, porém, que com o aumento da resolução numérica do modelo a região ao largo da costa brasileira seria uma contribuinte importante na geração de maré interna. Carrère *et al.* (2004), a partir de dados de altimetria do TOPEX/Poseidon analisados globalmente, destacam a Cadeia Vitória-Trindade (CVT) como uma região de intenso sinal baroclínico no Atlântico Sul.

A CVT apresenta complexa batimetria, se estendendo zonalmente por 950 km ao longo da latitude 20.3°S até as ilhas oceânicas de Trindade e Martin Vaz, a extensão emersa dessa cadeia (Fig. 1). Esta cadeia tem origem vulcânica e apresenta topografia irregular, com cerca de 30 montes submarinos. A complexa batimetria insere-se como uma barreira física para a dinâmica oceânica da região, tanto para o sistema Corrente do Brasil – Corrente de Contorno Intermediária, quanto para a Corrente de Contorno Profunda, determinando padrões de ramificações e contribuindo para a formação de diversos processos oceanográficos com implicações biológicas, como mistura vertical e ressurgências. Tendo em vista suas características singulares, a CVT representa um sistema importante nos aspectos geomorfológicos, biológicos e de circulação oceânica em águas brasileiras.

Recentemente, os resultados globais de Zhao *et al.* (2016), utilizando múltiplos satélites altimétricos, sugerem que na região da CVT há um sinal expressivo de geração de maré baroclínica da componente  $M_2$ . No entanto, esse sinal da maré interna gerada é atribuído à Elevação de Rio Grande.

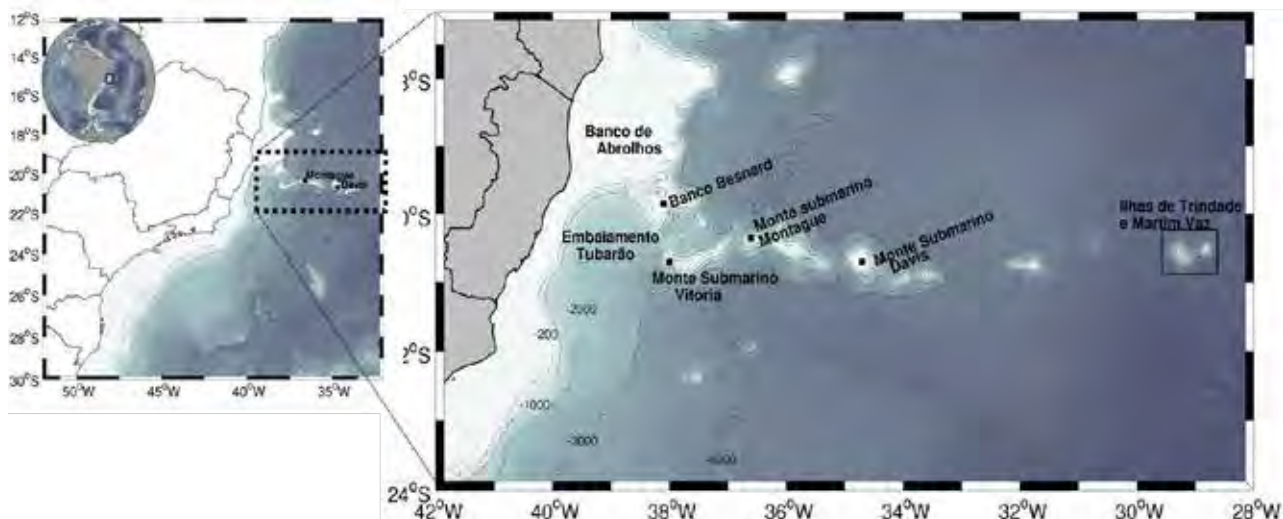


Fig. 1. A Cadeia Vitória-Trindade.

Resultados numéricos analisados no escopo da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica – REMO (Gabioux *et al.*, 2013) indicam que a CVT é uma fonte importante de geração de maré interna no Atlântico Sul. As componentes semidiurna e diurna da maré interna são evidentes em espectros de energia do modelo. Assim, a hipótese que norteia este trabalho é que a CVT, por suas características batimétricas, é um local de significativa geração de maré interna, com conversão de maré barotrópica para a maré baroclínica. O presente trabalho oferece uma abordagem complementar, a utilizar dados de altímetro e modelagem numérica, o que permite descrever o comportamento das ondas internas na frequência da maré em superfície e em profundidade.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Altimetria

Foram utilizados os dados altimétricos do satélite JASON 1, no período de agosto de 2002 a dezembro de 2008. Sua resolução temporal é de 9.9156 dias e resolução espacial de cerca de 6.2 km. Em particular, foi utilizado a altura da superfície do mar ao longo da trajetória do satélite, produto denominado CorSSH (*Along-track Corrected Sea Surface Height*). Produzidos e disponibilizados pela *Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data* - AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>), os dados apresentam correções instrumentais atmosféricas e geofísicas. Como descrito em Daher *et al.* (2014), no produto CorSSH é necessário incluir o sinal da maré barotrópica nos dados de elevação da superfície do mar, retirado após a correção de maré oceânica, o que minimiza os erros na elevação da superfície do mar para a análise da maré. Para separar a componente barotrópica e baroclínica da maré foi realizada uma filtragem

espacial entre 50-500 km, preservando o sinal da maré interna, assim como em Carrère *et al.* (2004). As principais componentes harmônicas da maré baroclínica foram obtidas por meio de análise harmônica de mínimos quadrados, de acordo com Franco e Alvarenga (2009).

### 2.2. Modelo HYCOM

O *Hybrid Coordinate Ocean Model* - HYCOM é um modelo oceânico de circulação que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas e possui um sistema generalizado de coordenadas verticais. Foi utilizada uma simulação de alta resolução *eddy-resolving* da região sudeste brasileira, realizada e validada no escopo da REMO (Gabioux *et al.*, 2013), capaz de representar fenômenos de meso e larga escala no oceano devido as forçantes nos contornos, efeitos em escala sinótica e oscilações associadas a maré astronômica. A simulação tem resolução horizontal de  $1/24^\circ$ , o que corresponde a 4.0 a 4.5 km, discretização vertical de 21 camadas isopícnicas, forçantes sinóticas do CFSR, integrada entre janeiro de 2004 e dezembro de 2010. O domínio de modelagem estende-se entre  $12^\circ\text{S}$  até  $34^\circ\text{S}$  e desde  $054^\circ\text{W}$  até  $032^\circ\text{W}$ . A simulação utilizada foi aninhada a uma outra simulação da METAREA V com resolução horizontal de  $1/12^\circ$ . A batimetria foi obtida a partir da Base Etopo 2 e posteriormente melhorada com base em folhas de bordo pertencentes a Marinha do Brasil, principalmente na região da CVT. A maré foi prescrita nos contornos levando em consideração as oito principais constantes harmônicas (M2, S2, N2, K2, O1, P1, Q1, K1), interpoladas a partir dos resultados do modelo TPX07.2 para o nível e a velocidade. Foram analisados os campos de altura da superfície do mar e profundidade da interface da camada de densidade representativa da região da termoclina.

### 3. RESULTADOS

Os dados altimétricos evidenciam a ocorrência de oscilações associadas a propagação de ondas internas em todo o Atlântico Sudoeste. As maiores amplitudes são encontradas nas proximidades da CVT, podendo chegar até 2.5 cm (Fig. 2, painel superior, trilhas 61 e 137). A fase da componente  $M_2$  evidencia a CVT como uma região geradora de maré interna, que se propaga para sul e para norte por toda a trilha e de maneira bem coerente por pelo menos 600 km (Fig. 2, painel inferior). Essa propagação é mais evidente nas defasagens da fase da trilha 137, ao sul da cadeia. Na cordilheira Havaiana, essa propagação também ocorre para sul e para norte, por pelo menos 1000 km (Ray e Mitchum, 1996).

Os resultados numéricos apontam para um sinal da componente  $M_2$  em superfície semelhante ao encontrado na altimetria, as maiores amplitudes estão nas proximidades da CVT e entre as latitudes  $21^\circ\text{S}$  e  $24^\circ\text{S}$ . Entretanto, o modelo superestima os valores de amplitude principalmente onde há amplificação do sinal, atingindo valores de até 5 cm (Fig. 3). As características da onda de maré baroclínica gerada na região da CTV a partir da análise dos dados altimétricos e resultados de simulação numérica são apresentados na Tabela I.

Ao sul da CVT, na direção do Monte Montague, há uma concentração do sinal na amplitude entre  $21.5^\circ\text{S}$  e  $22^\circ\text{S}$ . A análise do mapa de fase da componente  $M_2$  evidencia a propagação da onda de maré interna a partir da CVT. O padrão concêntrico das linhas de mesma fase converge na região entre  $21.5^\circ\text{S}$  e  $22^\circ\text{S}$  e, em seguida, espalha-se pelo domínio.

Analisando a geometria de parte da CVT, os montes Vitória, Montague e Jaseur se comportariam como um arco, uma lente, concentrando o sinal da maré interna em um ponto focal, entre as latitudes  $21.5^\circ\text{S}$  e  $22^\circ\text{S}$  e a longitude  $036.7^\circ\text{W}$ , com raio de, aproximadamente, 160 km (Fig. 3). A concentração do sinal da maré baroclínica no ponto focal presente na simulação numérica também é existente nos dados altimétricos. Embora a trilha 137 do JASON 1 não cruze exatamente a região focal, ao sul da CVT, entre as latitudes  $21^\circ\text{S}$  e  $24^\circ\text{S}$ , há uma amplificação do sinal na amplitude. Assim como parte da CVT é capaz concentrar o sinal da maré interna num ponto focal, Zhao e D'Asaro (2011) descrevem um comportamento semelhante no Arco das Marianas, no Oceano Pacífico. A particularidade da CVT é que

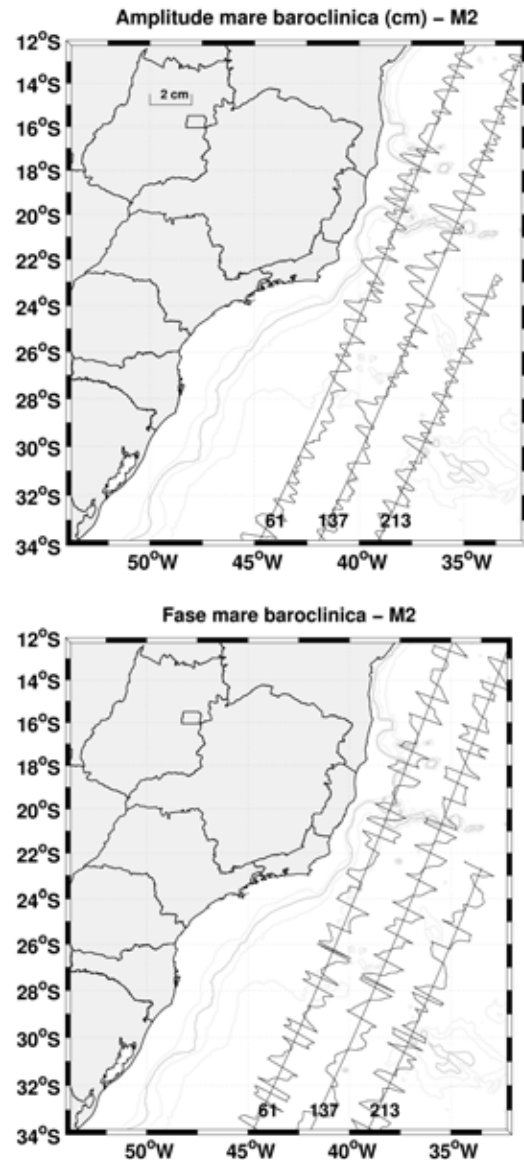


Fig. 2. Amplitude [cm] e Fase [graus] da componente  $M_2$  para as trilhas ascendentes 61, 137 e 213, na região da CVT.

somente uma parte se comporta como um arco e com isso, devido a sua extensão zonal, poderia haver interações entre a maré interna gerada na parte do arco e a gerada na região de montes isolados.

Enquanto em superfície o sinal da maré interna é de poucos centímetros, modulado pela interação com a maré barotrópica, em profundidade, esse sinal é da ordem de dezenas de metros, podendo atingir cerca

Tabela I. Características da onda baroclínica gerada na região da CVT.

		Amplitude	Fase	Comprimento de onda ( $1^\circ$ modo baroclínico)
$M_2$	Satélite	2 cm	~600 km para sul da CVT	125 km
	Modelo	5 cm	Ao norte e ao sul da CVT, propagação coerente por ~600 km. Interferência a leste de $035^\circ\text{W}$ e refração sobre a plataforma	115 km
$S_2$	Satélite	1 cm	~200 km para sul da CVT	115 km
	Modelo	2 cm	Ao norte e ao sul da CVT, propagação coerente por ~600 km. Interferência a leste de $035^\circ\text{W}$ e refração sobre a plataforma	110 km

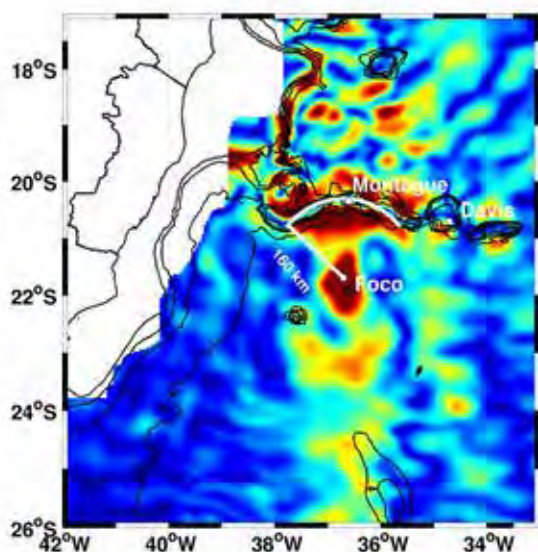


Fig.3. Amplitude [cm] da componente M<sub>2</sub> para uma porção do domínio do modelo. Parte da cadeia é descrita como um arco (curva branca) de raio máximo de 160 km.

de 100 m de deslocamento vertical das isotermas na região da termoclina. Esse movimento vertical, próximo a CVT, é capaz de promover que águas mais frias atinjam profundidades menores, podendo representar um aporte periódico de nutrientes para as camadas mais superficiais. Desta maneira, a maré interna forneceria grande parte da energia para a mistura e circulação vertical.

Fluxos de energia significativos para a componente M<sub>2</sub> são encontrados ao longo de toda a CVT, com valores da ordem de 10<sup>3</sup> W/m. Os valores máximos de fluxo de energia atingem 4kW/m, número análogo aos principais locais de geração de maré interna no globo.

#### 4. CONCLUSÃO

A CVT é um sítio expressivo para a geração de marés internas, que são irradiadas para altas e baixas latitudes no Atlântico Sudoeste, sendo a componente M<sub>2</sub> a constituinte mais importante na geração destas ondas. As características da onda de maré baroclínica gerada nesta, a partir dos dados altimétricos e dos experimentos numéricos, reforçam a CVT como um local de geração de maré interna relevante. A geometria de parte da CVT se assemelha a um arco, uma lente, concentrando o sinal da maré interna em seu ponto focal. Essa região focal é evidente nos campos de amplitude, em superfície e em profundidade, e no fluxo de energia das componentes semidiurnas.

#### Agradecimentos

Sinceros agradecimentos aos colegas do Laboratório de Oceanografia Física da COPPE/UFRJ, ao CNPq, ao INCT PRO-OCEANO, à REMO, ao Comandante João Alvarenga, Victor Daher e Dr. João Azevedo.

#### REFERÊNCIAS

- Alford, M.H., Peacock, T., Mackinnon, J.A., *et al.* (2015). The formation and fate of internal waves in the South China Sea. *Nature*, 521, 65–69.
- Carrère, L., Leprovost, C., Lyard, F. (2004). On the statistical stability of the M<sub>2</sub> barotropic and baroclinic tidal characteristics from along-track TOPEX/Poseidon satellite altimetry analysis. *Journal of Geophysical Research*, 109, 13.
- Craig, P.D. (1987). Solutions for the internal tide generation over coastal topography. *Journal of Marine Research*, 45, 83–105.
- Daher, V.B., Paes, R.V., França, A.G.B. (2014). Extraction of Tide Constituents by Harmonic Analysis Using Altimetry Satellite Data in the Brazilian Coast. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32, 614–626.
- Egbert, G.D e Ray, R.D. (2000). Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data. *Nature*, 405, 775– 778.
- Franco, A.D.S. e Alvarenga, J.B.R. (2009). *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. Diretoria de Hidrografia e Navegação. 344 pp.
- Gabioux, M., Costa, V.S., De Souza, J. (2013). Modeling the South Atlantic Ocean from Medium to High Resolution. *Brazilian Journal of Geophysics*, 31, 2, 229–242.
- Munk, W. e Wunsch, C. (1998). Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep Sea Research*, 45, 1976–2009.
- Powell, B.S., Janekovic, I., Carter, G.S., *et al.* (2012). Sensitivity of internal tide generation in Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 39, 10.
- Ray, R.D. e Mitchum, G.T. (1996). Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 23, 16, 2101–2104.
- Simmons, H.L., Hallberg, R.W., Arbic, B.K. (2004). Internal wave generation in a global baroclinic tide model. *Deep-Sea Research*, 51, 3043–3068.
- Vargas-Yáñez, M., Viola, T.S., Jorge, F.P. (2002). The influence of tide-topography interaction on low-frequency heat and nutrient fluxes. Application to Cape Trafalgar. *Continental Shelf Research*, 22, 1, 115 – 139.
- Zhao, Z., Alford, M.H., Girton, J.B., *et al.* (2016). Global Observations of Open-Ocean Mode-1 M<sub>2</sub> Internal Tides. *Journal of Physical Oceanography*, 46, 1657–1684.
- Zhao, Z. e D’Asaro, E. (2011). A perfect focus of the internal tide from the Mariana Arc. *Geophysical Research Letters*, 38, 14.

## Interação Atmosfera-Oceano num sistema de afloramento costeiro

J.M.R. Alves (1,2), A. Peliz (1), R. Caldeira (2,3) e P. M. A. Miranda (1)

- (1) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- (2) Observatório Oceânico da Madeira, Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação Tecnologia e Inovação, Funchal, Madeira, Portugal
- (3) CIIMAR, Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Porto, Portugal

**Resumo:** O sistema acoplado de simulação numérica Coastal Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) foi utilizado em diferentes configurações para simular o regime de afloramento na costa ocidental da Península Ibérica, durante o verão de 2012, com o objetivo de avaliar a interação atmosfera-oceano. Quando os resultados do modelo são comparados com medições de satélites e dados *in-situ*, o acoplamento tem um impacto moderado nos parâmetros estatísticos. No entanto, observa-se um reforço significativo dos coeficientes de acoplamento atmosfera-oceano na simulação acoplada (bidirecional), e nas simulações WRF e ROMS forçadas (unidirecional) por campos de temperatura da superfície do mar e vento, previamente simulados, respetivamente. Embora estes resultados não impliquem a necessidade de simulações acopladas (bidirecionais) em muitas aplicações, eles mostram que, em estudos numéricos sazonais, tais simulações não degradam o desempenho geral do modelo e contribuem para produzir melhores campos dinâmicos.

**Palavras-chave:** afloramento costeiro, Península Ibérica, acoplamento, oceano-atmosfera, COAWST.

### 1. INTRODUÇÃO

Devido à importância do afloramento costeiro nos ecossistemas marinhos, nas últimas décadas foram feitos inúmeros estudos de modelação numérica em zonas de afloramento costeiro (e.g. Peliz et al., 2002). Estes estudos têm sido maioritariamente baseados em modelos de circulação oceânica forçados unidireccionalmente com variáveis atmosféricas, que representam as condições da atmosfera junto à superfície do oceano. Contudo, recentemente, foi reconhecido que a interação atmosfera-oceano pode produzir diferenças relevantes no vento à superfície. Uma correlação entre o rotacional da tensão do vento à superfície e a componente do gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) perpendicular ao vento foi observada sobre frentes em oceano aberto (e.g. Chelton et al., 2004) e em zonas de afloramento costeiro (Chelton et al., 2007; Castelão, 2012; Desbiolles et al. 2014).

Neste trabalho é analisada a relação vento-TSM, numa região de afloramento costeiro, onde as interações atmosfera-oceano são significativas e são quantificadas as melhorias numa simulação acoplada atmosfera-oceano (bidirecional), em relação às simulações feitas com um só modelo. São apresentadas diferentes simulações com diferentes níveis de acoplamento e discutidos os custos e benefícios das diferentes metodologias.

Quando comparadas com as simulações forçadas unidireccionalmente, as simulações acopladas (bidirecionais), apresentam, teoricamente, algumas vantagens, pois estas conseguem simular processos de realimentação na interface atmosfera-oceano, que podem ser relevantes, por exemplo: (1) no

comportamento das camadas limites do oceano e da atmosfera, (2) nas alterações na tensão do vento à superfície sobre frentes, devido a modificações na TSM e (3) no efeito das correntes à superfície do oceano no vento à superfície.

### 2. MÉTODOS e DADOS

As simulações foram realizadas com o sistema acoplado Coastal Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport (COAWST). Esta ferramenta, de simulação numérica já foi utilizada com sucesso em diversos estudos de interação atmosfera-oceano, principalmente em eventos de tempestade ou furacões (eg. Renault et al., 2012 Olabarrieta et al., 2012). O sistema numérico é constituído por 3 modelos: para a atmosfera o Weather Research and Forecast (WRF), para o oceano o Regional Ocean Modelling System (ROMS) e para a agitação marítima o Simulating Waves Nearshore (SWAN) ou em alternativa o Wave Watch 3 (WW3). Neste estudo foi considerada uma configuração com os modelos WRF e ROMS, onde os modelos trocam as variáveis indicadas na figura 1, através do acoplador Modelling Coupling Toolkit (MCT) (Larson et al., 2005), a cada 5 minutos. Uma descrição detalhada da metodologia de acoplamento no COAWST pode ser encontrada em Warner et al (2008).

Na configuração do modelo WRF, foram utilizadas as seguintes opções: para a microfísica das nuvens: Single-Moment 3-class scheme, para a radiação de longo comprimento de onda: Rapid Radiative Transfer Model, para a radiação de curto comprimento de onda o Dudhia scheme, para a camada de superfície o Eta similarity scheme e para a camada limite planetária o Mellor–Yamada–Janjic



scheme. Uma descrição detalhada do modelo WRF, pode ser encontrada em Skamarock et al. (2008). No modelo ROMS, foram usadas condições fronteira de radiação e nudging para os traçadores (temperatura e salinidade) e para as velocidades baroclínicas, uma condição Flather para as velocidades barotrópicas e uma condição Chapman para a elevação da superfície livre. A mistura vertical turbulenta foi parametrizada com o esquema Generic Length Scale (GLS) com um fecho  $k-kl$  onde  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $l$  é uma escala de comprimento. Uma descrição aprofundada dos métodos numéricos usados no ROMS é apresentada em Shchepetkin et al (2005).

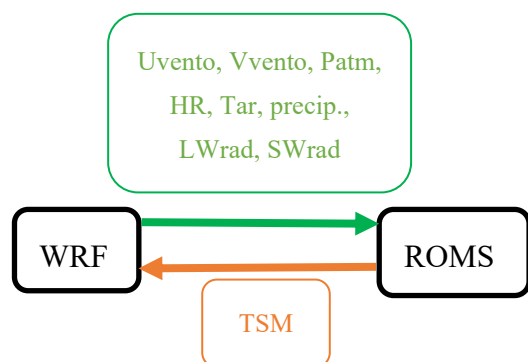


Fig. 1. Variáveis trocadas entre os modelos WRF e ROMS. Uvento componente zonal do vento, Vvento componente meridional do vento; Patm pressão atmosférica; HR humidade relativa; Tar temperatura do ar à superfície; precip. precipitação. SWrad radiação de curto comprimento de onda; LWrad radiação de longo comprimento de onda; TSM temperatura da superfície do mar.

Em ambos os modelos usou-se um domínio computacional comum com uma resolução de aproximadamente 6 km, numa projeção Mercator (ver limites do domínio na figura 2). O domínio WRF tem 40 camadas verticais sigma e o ROMS 32. Para o WRF as condições iniciais e fronteira foram retiradas do National Centre for Environmental Prediction (NCEP) com uma resolução espacial de 1° e temporal de 6 horas. Para o oceano as condições iniciais e fronteira foram retiradas do modelo oceânico global Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) usando o Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) com uma resolução de 1/12°. Para a batimetria foram usados dados do ETOPO1, como uma resolução de 1 minuto. Foi aplicado um filtro à batimetria para garantir um fator  $r$  ( $\nabla h/h$ ) inferior a 0.2.

### 2.1. Simulações numéricas

Neste estudo, foi analisado o período de 20 de Junho a 31 de Agosto de 2012. São apresentadas 4 simulações numéricas (tabela I): (a) W0, onde o WRF é forçado por dados de reanálise do NCEP, incluindo a TSM, a cada 6 horas; (b) WR1 onde o ROMS é forçado por vento à superfície, radiação de longo comprimento de onda, radiação de curto comprimento de onda, temperatura do ar a 2m da

superfície do oceano, pressão à superfície, humidade relativa e precipitação a cada 3 horas da simulação W0; (c) W01 semelhante a W0, mas usando TSM a cada 3 horas de WR1; (d) WR2 a simulação acoplada (bidirecional) entre o ROMS e WRF.

Tabela I Simulações numéricas

Experiencia	Descrição
W0	WRF (TSM de NCEP)
WR1	ROMS forçado por WRF (W0)
W01	WRF (TSM de WR1)
WR2	WRF e ROMS acoplados (bidirecional)

A simulação W01 teve como objetivo estudar o impacto de uma TSM de mais alta resolução, no vento à superfície, quando comparada com W0. As interações entre o vento e a TSM foram analisadas com a comparação das simulações com um só modelo forçadas unidirecionalmente, com a simulação acoplada (bidirecional).

### 2.2. Dados de deteção remota e observações in-situ

Dados de deteção remota e de observações in-situ foram utilizados para verificar a qualidade das variáveis simuladas numericamente, vento à superfície e TSM. Os dados de TSM de satélite foram obtidos do Pathfinder V5.2. Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de uma base de dados diária com dados interpolados, de modo a não ter pontos sem valores, e com uma resolução de 0.0417°. Dados do vento à superfície (CERSAT/IFREMER) com uma frequência diária foram obtidos do Advanced Scatterometer (ASCAT), com uma resolução de 0.25°. Foram também usados valores de TSM das boias de Silleiro e Porto (ver localização na figura 2). Estas boias estão localizadas numa zona onde se observa frequentemente afloramento costeiro e onde a profundidade é de cerca de 600m. Existe um controlo de qualidade dos dados destas boias, que elimina valores anómalos.

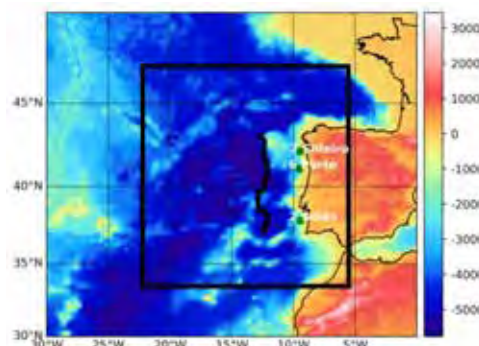


Fig2. Mapa batimétrico com o limite do domínio computacional delimitado pelo retângulo a negro. Pontos a verde indicam a localização das estações de Silleiro, Porto e Sines. A linha ao longo indica uma distância de 300 km da linha de costa, área onde alguns diagnósticos foram feitos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Vento à superfície e temperatura da superfície do mar

Os valores estatísticos das séries temporais da componente meridional do vento de todas as simulações apresentam valores semelhantes aos valores medidos por satélite, como indicam as elevadas correlações (0.86 a 0.92), os valores baixos do viés e o desvio padrão normalizado próximo de 1 (tabela II).

Tabela II Correlação, viés e desvio padrão ( $dp$ ) em Silleiro e Sines, da média diária da componente meridional do vento.

Silleiro Sines	r	Viés (mod – sat)	dp/dp_sat
W0	0.92 0.85	-0.06 -0.67	1.09 0.98
W01	0.92 0.86	0.17 -0.54	1.10 1.06
WR2	0.92 0.86	0.15 -0.59	1.09 1.04

Na TSM, os valores estatísticos com referência a dados de satélite e a duas boias (Silleiro e Porto), indicam uma redução do viés, uma correlação similar e um excesso de variabilidade na simulação acoplada (WR2) quando comparada com WR1 (tabela III).

Tabela III. Correlação, viés e desvio padrão ( $dp$ ) em Silleiro e Porto de médias diárias de tsm.

Silleiro satélite boia	r	Viés (mod – sat)	dp/dp_sat
WR1&W01	0.75 0.72	0.77 0.90	1.04 1.09
WR2	0.75 0.68	0.43 0.56	1.16 1.21

Porto satélite boia	r	Viés (mod – sat)	dp/dp_sat
WR1 & W01	0.74 0.81	0.40 0.97	0.97 1.18
WR2	0.77 0.80	0.07 0.65	1.10 1.33

#### 3.2. Acoplamento atmosfera-oceano

A covariação do rotacional da tensão do vento à superfície e da componente de gradiente de TSM perpendicular ao vento foi analisada com médias sobrepostas de 29 dias a cada 7 dias, nos 300 km mais próximos da costa ocidental da Península Ibérica (excluído os 25 km mais próximos da costa, não observados por satélites). Na figura 3, os dados são agrupados para diferentes valores da componente do gradiente de TSM perpendicular ao vento. Foram considerados todos os valores entre os quantis 1 e 99. A linha a azul representa o valor médio de cada grupo, as barras a localização de  $\pm 1$  desvio padrão do rotacional da tensão do vento, a linha vermelha representa o declive da regressão linear, referido também por coeficiente de acoplamento (Chelton et al., 2004), os valores de

correlação são também apresentados na figura. Os melhores valores entre dados de satélite e das diferentes simulações, são os de WR2, com valores idênticos de correlação (0.72) e muito semelhantes de coeficiente de acoplamento (0.89 vs 0.90). W01 tem um coeficiente de acoplamento ligeiramente inferior (0.86), mas uma correlação superior (0.80). A simulação W0 tem uma correlação muito baixa (0.16) e um coeficiente de acoplamento reduzido (0.60), enquanto que WR1 apresenta o coeficiente de acoplamento mais fraco (0.29), com uma correlação intermédia (0.48). O fato de W01 ser só marginalmente inferior a WR2 merece alguma discussão. Ambas as simulações usam vento de alta resolução fornecido pelo WRF à mesma resolução. Mas W01 requer 2 simulações prévias (W0 & WR1). A primeira para fazer um refinamento de dados atmosféricos, que são posteriormente utilizados para forçar uma simulação ROMS, a qual fornece a TSM de alta resolução usada em W01, de modo a que esta simulação tenha uma TSM de alta resolução, tal como WR2. Deste modo, conclui-se que o método WR2 é preferível uma vez que com menos tempo computacional produz resultados semelhantes ou melhores que o método seguido em W01. A boa comparação entre W01, WR2 e as observações de satélite também parecem indicar que uma só simulação a alta-resolução do WRF, com TSM de alta resolução conduzem a bons resultados, mas deve ser lembrado que em muitas regiões do oceano e em largos períodos de tempo dados de TSM a alta resolução não estão disponíveis.

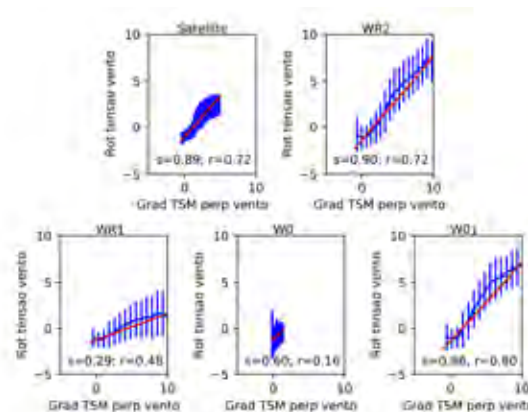


Figura 3. Diagrama de dispersão da tensão do vento ( $N.m^{-2}/10^4 km$ ) versus componente do gradiente de TSM ( $^{\circ}C/100 km$ ) perpendicular ao vento.

### 4. CONCLUSÃO

Sistemas acoplados (bidirecionais) atmosfera-oceano de modelação numérica, como o COAWST, em breve, tornar-se-ão a abordagem padrão para o estudo da maioria dos processos atmosféricos e oceânicos, pois são a melhor maneira de representar o forçamento e os processos de realimentação entre o oceano e a atmosfera. No presente estudo, focado na dinâmica do afloramento costeiro na costa Oeste da Península Ibérica, foi demonstrado que tal

abordagem é viável, com benefícios imediatos na representação dos campos médios do oceano e da atmosfera. Usando um conjunto de simulações com diferentes níveis de acoplamento, desde o acoplamento unidirecional até ao acoplamento bidirecional, foi mostrado que este último leva a uma melhoria das estatísticas das simulações.

### Agradecimentos

O primeiro autor agradece o apoio dado por John Warner, aquando da sua visita às instalações do USGS, em Woods Hole, Massachusetts, EUA. Rui Caldeira e José Alves foram financiados pelo Observatório Oceânico da Madeira FEDER-Project (M1420-01-0145-FEDER-000001-Observatório Oceânico da Madeira-OOM). Pedro Miranda e Álvaro Peliz foram financiados pela bolsa FCT ECI/GEO-MET/0380/2012, que ofereceu as infraestruturas computacionais usadas para fazer as simulações numéricas.

### REFERÊNCIAS

- Castelão, R.M. (2012). Sea surface temperature and wind stress curl variability near a cape. *Journal Physical Oceanography* 42,2073–2087.
- Chelton, D.B., Schlax, M.G., Freilich, M.H., Milliff, R.F. (2004). Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds. *Science* 303, 978–983.
- Chelton, D.B., Schlax, M.G., Samelson, R.M. (2007). Summertime coupling between sea surface temperature and wind stress in the California Current System. *Journal of Physical Oceanography* 37, 495–517.
- Desbiolles, F., Blanke, B., Bentamy, A. (2014). Short-term upwelling events at the western African coast related to synoptic atmospheric structures as derived from satellite observations. *Journal of Geophysical Research Oceans* 119, 461-483.
- Larson, J., Jacob, R., Ong, E. (2005). The model coupling toolkit: a new Fortran90 Toolkit for building multiphysics parallel coupled models. *The International Journal of High Performance Computing Applications* 19 (3), 277–292.
- Olabarrieta, M., Warner, J.C., Armstrong, B., Zambon, J.B., He, R. (2012). Ocean-atmosphere dynamics during Hurricane Ida and Nor'Ida: an application of the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling* 43–44, 112–137.
- Peliz, A., Rosa, T., Santos, A.M.P., Pissarra, J. (2002) Fronts, jets, and counter flows in the Western Iberian upwelling system *Journal of Marine Systems* 35 (1–2), 61-77.
- Renault, L., Chiggiato, J., Warner, J.C., Gomez, M., Vizoso, G., Tintoré, J. (2012). Coupled atmosphere-ocean-wave simulations of a storm event over the Gulf of Lion and Balearic Sea. *Journal Geophysical Research* 117, C09019.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.C. (2008). A description of the Advanced research WRF version3. NCAR Techn.Note 475.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling* 9 (4), 347–404.
- Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C., Arango, H.G. (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers and Geosciences* 34, 1284–1306.

# Agitação marítima em Portugal continental nos dias 17 e 18 de Janeiro de 2018

B. Café (1), R. Tavares (1)

(1) Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) bruno.cafe@ipma.pt.

**Resumo:** Com base na análise da situação sinóptica do Atlântico Norte, no período compreendido entre os dias 14 e 19 de janeiro de 2018, pretendeu-se identificar como e onde se geraram as ondas, a sua propagação, e os efeitos que tiveram na costa ocidental de Portugal continental, em especial junto ao Canhão da Nazaré. Para isso utilizou-se o modelo do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) para a caracterização atmosférica e os modelos LAM, WAM e SWAN para a previsão da geração e propagação das ondas. Recorreu-se também a meios de observação remota como o sensor ASCAT, integrado nos satélites Metop-A e B, que permite estimar o vento a 10 metros sobre a superfície do mar e o altímetro Poseidon-3, a bordo do satélite OSTM/JASON, que permite estimar a altura significativa das ondas.

**Palavras-chave:** Agitação marítima, Ondas, ASCAT, Jason, Canhão da Nazaré.

## 1. INTRODUÇÃO

A terceira semana de Janeiro de 2018 foi caracterizada pela ocorrência de centros de baixas pressões junto à Islândia e de centros de altas pressões a oeste dos Açores. Esta situação originou agitação marítima forte no Atlântico Norte e na costa ocidental de Portugal Continental, nos dias 17 e 18 de Janeiro, com emissão de avisos de agitação marítima forte pelo IPMA, quer nos boletins de alto mar, quer para a costa ocidental. Este fenómeno atraiu, mais uma vez, as atenções para a Nazaré. Esta é uma situação típica de Inverno na região do Atlântico Norte, em que o anticiclone dos Açores se desloca para latitudes mais a sul permitindo a passagem de superfícies frontais e depressões nas regiões mais a norte.

## 2. SITUAÇÃO SINÓPTICA

### 2.1 Caracterização da situação

No dia 14 de Janeiro, a situação sinóptica era caracterizada por um anticiclone bastante intenso (superior a 1040 hPa) localizado a oeste do arquipélago dos Açores e por uma depressão bastante cavada (cerca de 940 hPa) centrada na região da Islândia (Fig.1).

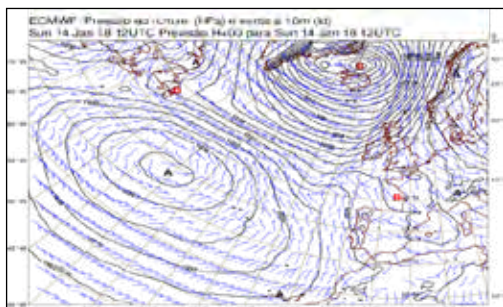


Fig. 1. Carta do ECMWF com pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento a 10 metros (kt) para o dia 14 de Janeiro às 12UTC.

Esta situação não sofreu grandes alterações até ao dia 15 de Janeiro. A partir do dia 16 de Janeiro, o

anticiclone enfraqueceu gradualmente para 1030 hPa e a depressão encheu para valores de 970 hPa (Fig.2).

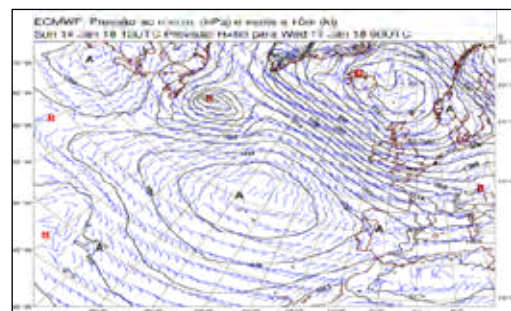


Fig. 2. Carta do ECMWF com pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento a 10 metros (kt) para o dia 17 de Janeiro às 00UTC.

Este dipolo Norte-Sul gerou um forte gradiente de pressão no Atlântico Norte, dando origem a vento muito intenso ao longo destes dias, com rajadas que se previa atingir valores superiores a 160 km/h junto à Gronelândia (Fig.3).

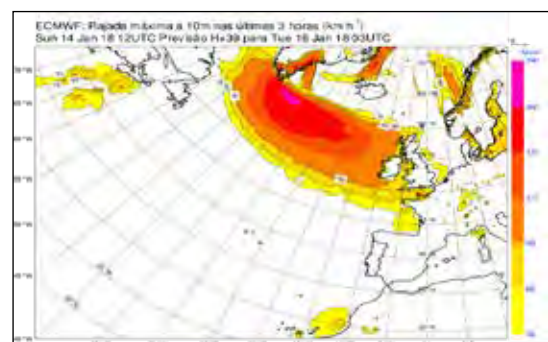


Fig. 3. Carta do ECMWF com rajada máxima a 10 metros (km/h) nas últimas 3 horas para o dia 16 de Janeiro às 03UTC.

O vento é o fator mais importante na geração de ondas. Esta depende de mais duas variáveis, a área de geração e o período de tempo durante o qual o vento afeta essa área. Nesta situação tivemos vento intenso que se prolongou ao longo de vários dias sobre uma vasta área do Atlântico Norte.

## 2.2. Oscilação do Atlântico Norte

A NAO (Oscilação do Atlântico Norte) é um índice, para o Atlântico Norte que mede a diferença de pressão entre o anticiclone subtropical com o centro localizado em média na região dos Açores e a depressão subpolar, com o centro localizado em média junto à Gronelândia.

Na prática, normalmente, calcula-se como as diferenças para a normal da pressão ao nível médio do mar entre as estações de Ponta Delgada e de Akureyri na Islândia, ou entre a de Lisboa e a de Stykkishólmur na Islândia, dependendo dos autores. A fase positiva da NAO é caracterizada por valores de pressão acima do normal na parte central do Atlântico Norte e abaixo do normal na Islândia (Wang e Jianping, 2003).

Na fase positiva da NAO, verifica-se um aumento do percentil 90 da altura significativa das ondas (Wang e Swail, 2000). As alterações significativas do percentil 90 no Inverno nas últimas quatro décadas do século passado têm uma ligação muito próxima com variações significativas da NAO (Wang e Swail, 2000).

De acordo com os dados disponibilizados na página Web da NOAA os valores diários da NAO para este período atingiram um máximo de 1,667 no dia 15, 1,582 no dia 14, 1,430 no dia 16 e 1,184 no dia 17 ([www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao](http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao), 2018).

## 3. CARACTERIZAÇÃO DO CANHÃO DA NAZARÉ

Definindo-se a menos de 500 metros da costa, o troço inicial do canhão da Nazaré apresenta orientação WSW, formando profundo entalhe na plataforma continental. A cerca de 6 km da costa inflete para NW, voltando à direção WSW a cerca de 12 km da Nazaré, acabando por se orientar para W no troço terminal, desembocando na Planície Abissal Ibérica a cerca de 5000 metros de profundidade. Com 170 km de comprimento, constitui verdadeira garganta submarina até mais de 2000 metros de profundidade (Dias, 2013).

As ondas que chegam à zona costeira propagam-se mais rapidamente sobre o Canhão da Nazaré, onde a água é mais profunda, do que na plataforma continental adjacente. Esta diferença na propagação da onda modifica a orientação das linhas de cristas e cavas, criando zonas onde a onda converge. Esta convergência focaliza a energia da onda traduzindo-se numa amplificação da mesma. Este processo parece ser particularmente eficaz na zona ao largo da Praia do Norte, durante os períodos de ondulação predominante de noroeste e oeste (<http://www.hidrografico.pt/noticia-ondas-gigantes-nazare.php>, 2018).

## 4. OBSERVAÇÃO REMOTA

### 4.1. ASCAT

O ASCAT é um *scatterometer* a bordo dos satélites Metop-A e B que permite estimar a velocidade e direção do vento a 10 metros de altura sobre a superfície livre do oceano. Tem tipicamente duas passagens por dia no Atlântico Norte com duas faixas de 500 km de largura cada, separadas por 700 km, e uma resolução espacial de 25 km, podendo medir ventos até 180 km/h (ASCAT Wind Product User Manual, 2016).

Nas passagens dos satélites Metop durante a terceira semana de Janeiro, observou-se vento com força Temporal (48 a 55 kt) medido na escala de Beaufort numa vasta região do Atlântico Norte (Fig.4).

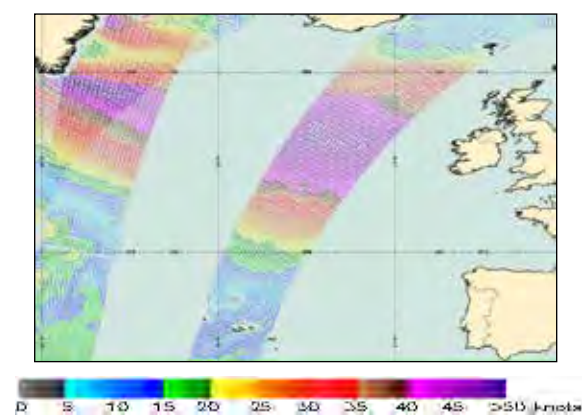


Fig. 4. Passagens dos satélites Metop-A e B no dia 16 de Janeiro retiradas do ePort PRO da EUMETRAIN.

### 4.2. OSTM/JASON

O OSTM/JASON é um satélite que carrega a bordo o altímetro Poseidon-3, que permite estimar a altura significativa das ondas com grande precisão (em ondas de 2 metros tem-se verificado um viés de 10 cm). Esta corresponde à média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação. O período de revisita, aquele em que este satélite volta a observar o mesmo ponto, é bastante longo, aproximando-se dos 10 dias (IFS Documentation, 2017).

Nas passagens dos satélites OSTM/JASON no dia 16 de Janeiro, observaram-se ondas com 15 metros de altura significativa entre a Gronelândia e a Islândia (Fig.5) e, mais tarde, no dia 17 de Janeiro, ondas com 9 metros na parte norte da zona Charcot da MetArea II (Fig.6).

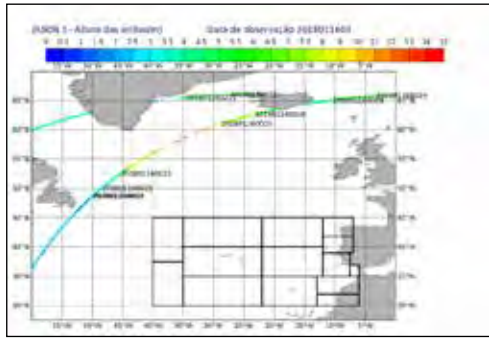


Fig. 5. Passagens dos satélites OSTM/JASON no dia 16 de Janeiro às 00 e 02UTC.

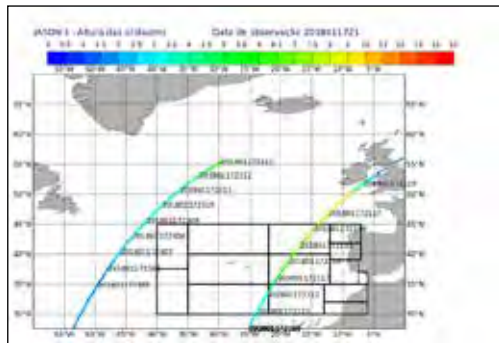


Fig. 6. Passagens dos satélites OSTM/JASON no dia 17 de Janeiro às 21 e 23UTC.

## 5. OBSERVAÇÃO JUNTO À COSTA

Como meio de observação junto à costa a norte do Cabo Raso estão disponíveis as bóias do Instituto Hidrográfico, a de Leixões e as do projeto MONICAN junto à Nazaré.

Na bóia de Leixões observaram-se ondas com altura significativa de 8 metros nos dias 17 e 18, com alturas máximas de 13 metros (Fig.7).



Fig. 7. Dados da bóia de Leixões do Instituto Hidrográfico para os dias 17 e 18 de Janeiro.

Na bóia Monican02, apesar de se encontrar mais longe da área de geração das ondas, observaram-se ondas mais elevadas, com altura significativa de 9 metros e altura máxima de 15 metros (Fig.8).

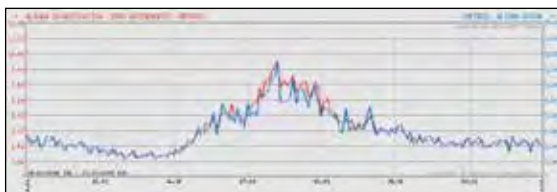


Fig. 8. Dados da bóia Monican02 para a terceira semana de Janeiro.

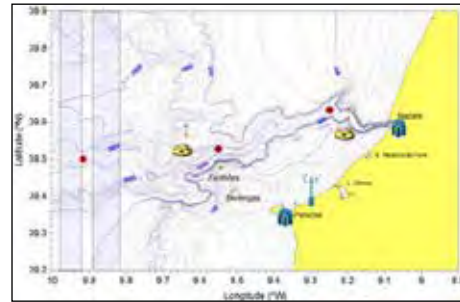


Fig. 9. Localização das bóias Monican01 (ao largo) e Monican02 (junto à costa) do projeto MONICAN.

## 6. VERIFICAÇÃO DA PREVISÃO

### 6.1. Modelos de Ondas

Para a previsão do estado do mar foram utilizados os modelos do ECMWF, WAM e LAM (IFS Documentation, 2017). O ECMWF WAM é um modelo global com resolução espacial de 0.25°, discretização espectral de 36 frequências e 36 direções. O ECMWF LAM é um modelo de ondas de área limitada, cobrindo a maior parte do Atlântico Norte com 0.1° de resolução, discretização espectral de 36 frequências e 36 direções.

### 6.2. Verificação

No dia 16 de Janeiro observa-se uma boa relação entre a altura significativa das ondas previstas pelo modelo e as observadas pelo satélite OSTM/JASON na zona de geração (Fig.10).

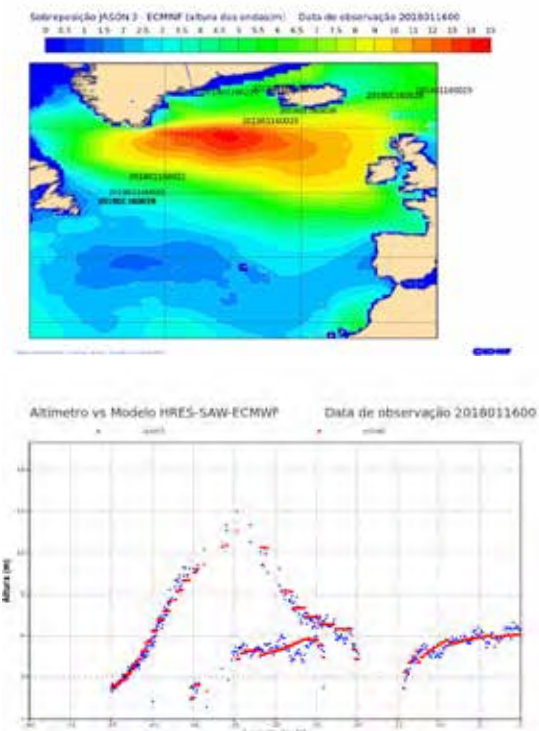


Fig. 10. Comparação dos dados do OSTM/JASON e da previsão do modelo do ECMWF no dia 16 de Janeiro.

No dia 17 de Janeiro, entre as longitudes 20°W e 10°W, o modelo prevê ondas inferiores, em alguns locais em quase 2 metros, possivelmente relacionados

com o desempenho do modelo ECMWF, à observação feita pelo satélite OSTM/JASON (Fig.11).

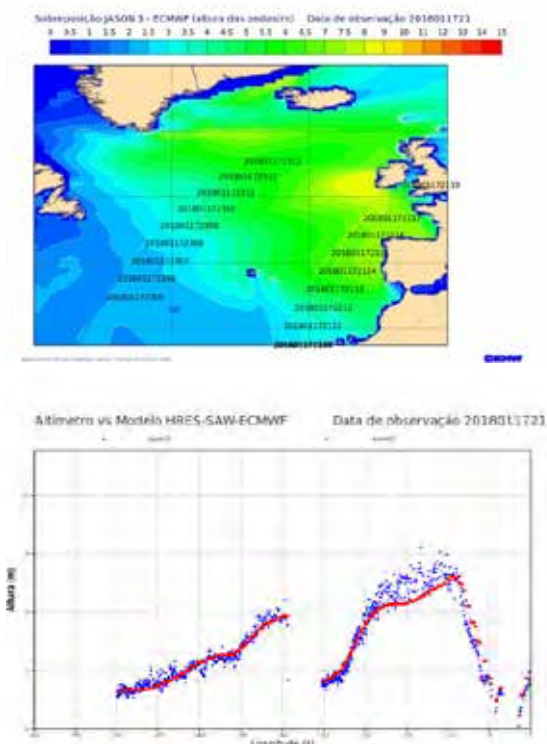


Fig. 11. Comparação dos dados do OSTM/JASON e da previsão do modelo do ECMWF no dia 17 de Janeiro.

Os dados obtidos pelas bóias e através de satélite mostram bem a intensidade das ondas durante este período, sendo que na região do canhão da Nazaré as ondas terão sido superiores a estes valores, como relatado em vários meios de comunicação, entre eles no *site* [www.nazarewaves.com](http://www.nazarewaves.com), com vários registos fotográficos (Fig.12).

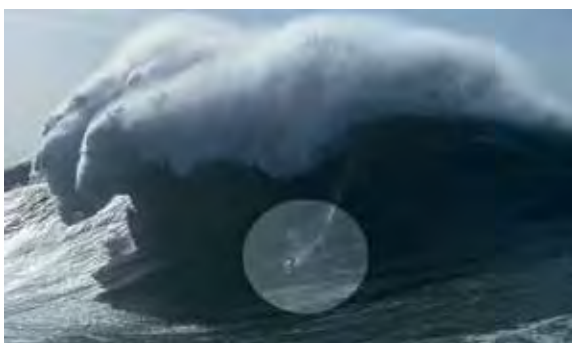


Fig. 12. Foto tirada por André Botelho no dia 18 de Janeiro de 2018 na Nazaré ([www.nazarewaves.com/pt/news/150](http://www.nazarewaves.com/pt/news/150)).

## 7. CONCLUSÕES

No evento analisado, em regiões afastadas da costa, os valores previstos pelos modelos e os dados de observação aproximaram-se bastante, tendo-se verificado no entanto, em alguns locais, valores máximos previstos bastante inferiores aos observados por satélite.

De salientar a importância de projetos como o MONICAN, que podem permitir um melhor conhecimento do impacto das características da costa na ondulação. Na realidade, a bóia colocada no canhão, apesar de se encontrar ainda afastada da costa, apresentou valores de ondulação superiores aos de Leixões contra o que seria espectável perante a situação sinóptica geradora.

Em ambiente operacional os dados de observação *in situ* e de observação remota são fundamentais para a vigilância das áreas de mar de responsabilidade nacional e para uma contínua aferição da qualidade das previsões dos modelos.

## REFERÊNCIAS

- ASCAT Wind Product User Manual (2016). OSISAF - EUMETSAT. 23 pp.
- Dias, J.A. (2003). *Portugal e o Mar: Importância da Oceanografia para Portugal*. Apenas Livros. 14 pp.
- IFS Documentation – Cy43r3 (2017). *Part VII: ECMWF Wave Model*. ECMWF. 19 pp.
- Jason-3 Products Handbook (2016). EUMETSAT. 70 pp.
- Wang, X. L., e Jianping, L. I. (2003). A New North Atlantic Oscillation Index and Its Variability. *Advances in Atmospheric Sciences*. Vol 20, Nº5, 661-676.
- Wang, X. L., e Swail, V. R. (2000). Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes. *Journal of Climate*. *Oceanography*, 14, 2204-2221.
- [www.hidrografico.pt/noticia-ondas-gigantes-nazare.php](http://www.hidrografico.pt/noticia-ondas-gigantes-nazare.php)
- [www.nazarewaves.com/pt/news/150](http://www.nazarewaves.com/pt/news/150)
- [www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao](http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao)

# Climatologia das águas da Zona Económica Exclusiva de Angola

E. Vasco (1), J. Dubert (2), R. Nolasco (1,2), N. Cordeiro (1), P. Relvas (3)

(1) Universidade de Aveiro, Departamento de Física 3810-134, Aveiro. E-mail: [enoquevasco@gmail.com](mailto:enoquevasco@gmail.com)

(2) Universidade de Vigo, Departamento de Física Aplicada, Vigo

(3) Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e Tecnologia, Gambelas

**Resumo:** Descrevem-se aspetos da climatologia físico-química da ZEE Angolana com base em dados in situ (1994-2014), contribuindo para o conhecimento dos valores climatológicos sazonais da temperatura, salinidade e, oxigénio (estação quente e fria). Analisam-se secções verticais e séries temporais de anomalias. A variação de temperatura apresenta grandes amplitudes superficiais a Norte (entre 24°C e >29°C) e a Sul (17°C a 22°C), nas épocas fria e quente, respetivamente. Na estação quente há subsidência entre 25m e 250m e, na fria, as águas mais profundas afloram. A pluma fluvial na plataforma continental é muito forte a Norte durante todo o ano, fundamentalmente devida ao Rio Congo. Nas anomalias sazonais de temperatura observa-se correlação negativa com a salinidade e positiva com oxigénio (estação quente). Águas da Corrente de Angola da camada sub-superficial são mais salinas e menos oxigenadas. Abaixo desta camada, situam-se Águas Centrais do Atlântico Sul, com temperatura e salinidade mais baixas.

**Palavras-chave:** Corrente de Angola, Sistema de Benguela, climatologia oceânica, CTD

## 1. INTRODUÇÃO

A costa de Angola, localiza-se na transição das regiões tropical e subtropical da costa oriental do Atlântico Sul. Caracteriza-se por possuir duas estações principais bem definidas: a estação quente (janeiro a abril) e a estação fria (maio a agosto).

As precipitações ao longo da costa angolana diminuem gradualmente de Norte para Sul. A zona mais seca é a região costeira do deserto do Namibe.

A zona costeira está sujeita à influência de ventos pouco variáveis, denominados “Alísios do Sudoeste” provocados pela depressão térmica da parte Sul do Continente Africano e um máximo de altas pressões sobre o Atlântico Sul, que influenciam o regime de circulação oceânica. Apesar dos levantamentos hidrográficos se terem iniciado nos anos 60, a ZEE não tem sido suficientemente descrita. Nos últimos 30 anos têm vindo a realizar-se cruzeiros semestrais com o "R/V Dr. Fridtjof Nansen" no âmbito do Programa Nansen. A existência desses dados são a motivação principal para o desenvolvimento deste trabalho.

### 1.1. Corrente Quente de Angola

A Corrente quente de Angola constitui o borde leste do giro ciclónico do Golfo da Guiné, formada pelo ramo Sudeste da Contracorrente Sul Equatorial, e tem fluxo rápido e estreito (Moroshkin *et al.*, 1970). A temperatura superficial é superior a 24°C e a salinidade inferior a 36.4 (Lass *et al.*, 2000). A velocidade à superfície pode atingir valores superiores a 70 cm/s aos 100 m de profundidade no verão (Dias, 1983a,b). No inverno, esta é inferior a 40 cm/s da superfície até aos 100 m (Berrit & Dias, 1977; Moroshkin *et al.*, 1970; O'Neill *et al.*, 2003).

Durante o inverno e a primavera, essa massa de água quente (27-30°C) desloca-se para Noroeste, sendo substituída por águas ligeiramente mais frias (20-26°C). Outros autores referiram recentemente que a variabilidade da Corrente de Angola sofre inversões, parcialmente controladas pelas ondas de Kelvin e ventos locais (Ostrowski *et al.*, 2009; Rouault, 2007).

### 1.2. Corrente Fria de Benguela

A Corrente de Benguela é parte do giro anticiclónico subtropical do Atlântico Sul, flui para Norte ao largo da costa Sudoeste Africana. As suas fontes incluem águas da termoclina subtropical dos Oceanos Índico e do Atlântico Sul, mais salinas. Expande-se ao largo entre 200-300 km e pode atingir 750 km a Norte (Shannon, 1985). A sua velocidade é variável, com um valor médio à superfície de cerca de 17 cm/s a Norte da Zona frontal Angola-Benguela, onde convergem os sistemas da corrente de Angola e da corrente de Benguela (Taouanton & Shanon, 1988). Devido ao enfraquecimento dos ventos alísios, a corrente de Benguela enfraquece na estação quente (janeiro-abril). Na estação fria (maio-agosto), a temperatura à superfície é de 17°C à 21°C e a salinidade aumenta para 35.3 a 36 (Strømme *et al.*, 1991).

### 1.3. A Frente Angola - Benguela

A Zona Económica Exclusiva Angolana está inserida nos dois ecossistemas da costa da África austral, o ecossistema da Corrente fria de Benguela e o Ecossistema da Corrente quente de Angola. A Frente Angola-Benguela é a zona onde interagem os dois Sistemas (Meeuwis & Lutjeharms, 1990; Lass *et al.*, 2000). Esta zona varia sazonalmente entre 16-14°S (Grundlingh, *et al.*, 1979). A interação entre as



duas correntes influencia a dinâmica do ecossistema costeiro angolano, provocando alterações nos processos físico-químicos e biológicos. Na estação fria, o fortalecimento do anticiclone do Atlântico Sul potencia a corrente fria de Benguela e sua influencia se faz sentir com intensidade relativa na região centro da costa Angolana.

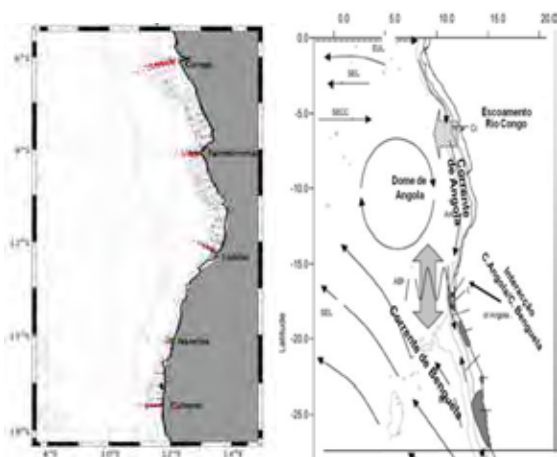


Fig.1 a) Mapa de Angola, com as secções principais utilizadas. b) Esquema da circulação oceânica da costa angolana e do Sudoeste Africano no verão austral adaptado de Hardman-Mountford, et al., 2003.

## 2. MÉTODOS

Neste trabalho analisam-se 3 das 5 linhas principais de monitorização (Congo, Lobito e Cunene). Estas linhas (Fig. 1) são amostradas duas vezes por ano: na estação quente e na estação fria. Com base nos dados obtidas construíram-se secções verticais sazonais. Para ser considerado um perfil vertical numa secção para elaboração da climatologia, esta deve ter um mínimo de 5 anos de ocorrências. Com base na climatologia e médias das secções para cada estação de cada ano, calcularam-se as anomalias, integradas para profundidades desejadas (100m). Foram identificados os anos sazonalmente quentes e frios. Os dados consistem em perfis verticais de CTD, medindo temperatura, salinidade e oxigénio. Foram também calculadas anomalias destas variáveis, e distribuições horizontais destas variáveis.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Secções climatológicas

Os resultados descritos neste estudo estão baseados na climatologia calculada através da média de longo termo de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido de cada secção.

Na secção de Congo (Fig. 2), na estação quente, observa-se a presença da corrente de Angola em direção Sul, que está associada ao afundamento do campo da temperatura e salinidade em direção à costa entre os 50 e os 150m de profundidade, com um sinal de salinidade mais elevado, com valores à volta dos 36. É clara a presença da pluma do rio Congo, com valores de salinidade inferiores a 34. O

campo de oxigénio é caracterizado por baixos valores nas camadas mais profundas, ao nível das águas centrais, e uma camada de superfície bem oxigenada. Na estação fria, é observada a tendência para a inversão do sentido da corrente, associada à tendência para afloramento costeiro.

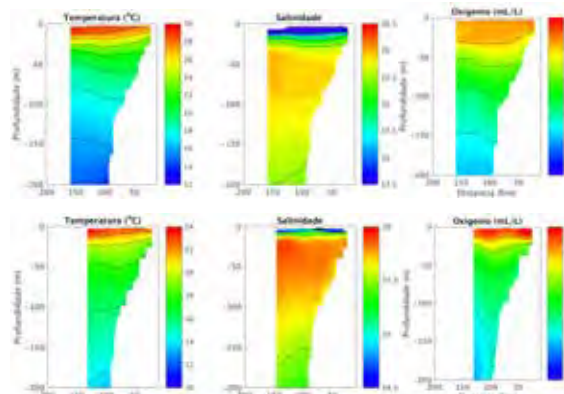


Fig. 2. Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção de Congo na estação quente (em cima) e na estação fria (em baixo).

Na secção do Lobito (Fig. 3), na estação quente, a presença da corrente de Angola é claramente visível nos campos de temperatura, salinidade e oxigénio. A pluma associada aos rios desta zona é menos intensa (salinidades mais elevadas) do que a do Rio Congo a Norte, não sendo visível na estação fria. O campo de oxigénio é caracterizado por baixos valores nas camadas mais profundas, e uma camada de superfície bem oxigenada. Na estação fria, é observada a tendência para a inversão do sentido da corrente de Angola à semelhança da zona norte.

Na secção de Cunene (Fig. 4), é visível a influência do sistema de corrente de Benguela através do afloramento observado perto da superfície, na estação quente, embora nos níveis mais profundos seja observada subsidência. Durante a estação fria, o afloramento costeiro, devido à resposta aos ventos alísios, é predominante nas três variáveis, com elevações das linhas na secção desde cerca de 100m até à superfície, e águas afloradas menos oxigenadas em superfície, na época fria.

### 3.2 Anomalias integradas

Por forma a identificar a variabilidade inter-anual das variáveis hidrológicas, foram calculadas as anomalias integradas, entre a superfície e os 100m de profundidade, e entre a costa e o largo, para as 5 secções principais, de N a S: Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene, para as estações quente (Fig. 5) e fria (Fig. 6). Estas anomalias permitem identificar os anos em que estas ocorreram e identificar os processos atmosféricos e oceanográficos responsáveis.

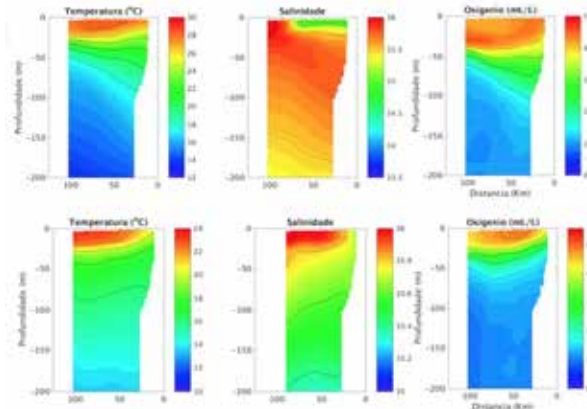


Fig. 3. Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido para a secção de Lobito na estação quente (linha superior) e na estação fria (linha inferior).

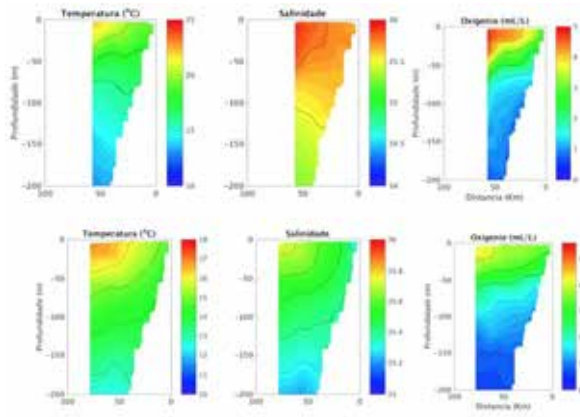


Fig. 4. Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido para a secção de Cunene na estação quente (linha superior) e na estação fria (linha inferior).

Observa-se que durante a estação quente, (Fig. 5) nos anos em que ocorreram anomalias positivas de temperatura nas secções mais a norte, Congo e Palmeirinhas, (que corresponderam a anomalias positivas de temperatura na atmosfera), estas estavam associadas a anomalias de salinidade predominantemente negativas, devido a uma maior precipitação e maior escoamento fluvial. Os anos em que este fenómeno aconteceu são 1995, 1996, 2006, 2007 e 2011. Por oposição, os anos em que as anomalias de temperatura são negativas (1997, 2004, 2005) as anomalias de salinidades são positivas, associadas a uma menor precipitação e escoamento fluvial. Esta correlação negativa não se observa nas secções a sul, devido ao diferente regime de precipitações e escoamento fluvial a essas latitudes.

No caso da estação fria, Fig. 6, (estação de menor precipitação) observa-se uma tendência para uma correlação positiva entre os campos de temperatura e salinidade, o que pode ser explicado pela ausência de precipitações, redução de fluxos fluviais (caudal) e a menores taxas de evaporação nesta época, e, consequentemente salinidade mais elevada.



Fig. 5. Anomalias de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido, em relação ao valor climatológico, integradas entre a superfície e os 100m de profundidade, para os diferentes anos amostrados, durante os cruzeiros realizados na estação quente. As cores representam as 5 secções, de N a S: Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene, localizadas na Fig 1.

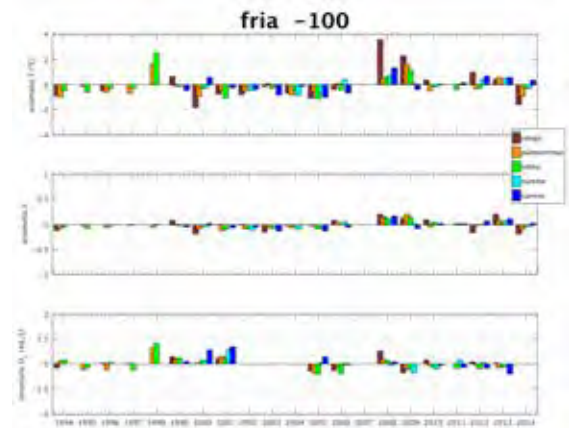


Fig. 6. Igual a Fig.5 mas para as campanhas realizadas na estação fria.

### 3.3. Distribuições horizontais de temperatura

Foram ainda calculadas as distribuições horizontais da temperatura a diferentes profundidades (10m e 100m) para a estação quente e fria (Fig. 7). Esta distribuição evidencia o gradiente meridional, com temperaturas mais elevadas na região tropical a norte, e temperaturas mais baixas a sul, deixando em evidência a localização da região de máximo gradiente, denominada frente Angola-Benguela, na latitude de 13-15° S. É também evidenciada a diferença sazonal das temperaturas entre a época quente e fria na plataforma angolana.

## 4. CONCLUSÕES

São apresentadas as principais características hidrológicas da região da ZEE de Angola baseadas nos resultados obtidos com o programa de monitorização Nansen, evidenciando a presença dos dois sistemas de correntes principais na região: a corrente de Angola e de Benguela, assim como a frente que separa ambas correntes. Durante a estação quente, é observada a tendência para a subsidência das águas e correlação negativa de anomalias de

temperatura e salinidade (para a região norte). Na estação fria há ressurgência e correlação positiva entre as anomalias dos campos de temperatura e de salinidade.

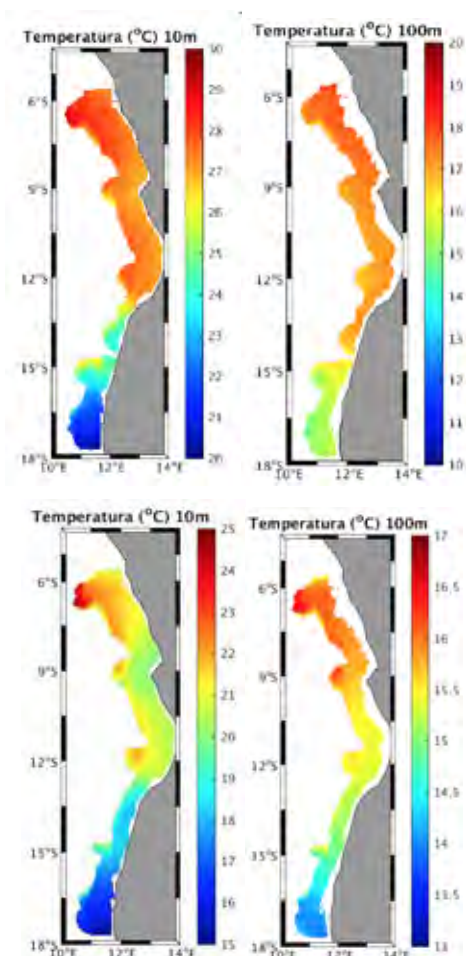


Fig. 7. Distribuição climatológica de temperatura perto da superfície, 10m e a 100m de profundidade. Linha superior para a estação quente e linha inferior para a estação fria.

### Agradecimentos

Ao Ministério das Pescas da República de Angola, em especial sua Excelentíssima Ministra das Pescas Victória de Barros Neto, que gentilmente concedeu a bolsa de estudos para a concretização deste projeto. À Direção Geral e Direção Técnica do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira de Angola pela permissão ao acesso aos dados. Ao Programa Nansen que, nas pessoas dos Doutores Marek Ostrowski e Inês Bernardes pela cedência de dados ([http://www.imr.no/forskning/utviklingssamarbeid/eaf\\_nansen\\_programmet/nansis/en](http://www.imr.no/forskning/utviklingssamarbeid/eaf_nansen_programmet/nansis/en)). Ao Programa PREFACE (<http://nansclim.org/m>) À Universidade de Aveiro, em especial, o Departamento de Física pela cedência de instalações e equipamentos.

### REFERÊNCIAS

- Berrit, G. R. & Dias, C. A. (1977). Hydroclimatologie des Régions Côtières de L'Angola. Cahiers ORSTOM, Séries Océanographie, 15, 181–196.
- Dias, C.A. (1983a). Note on the evidence of a permanent southward flow of the upper oceanic tropospheric waters off Angola at 12°S. *Collection of Scientific Papers ICSAF*, 10, 99-102.
- Dias, C.A. (1983b). Preliminary report on the physical oceanography off southern Angola, March and July 1971. *Collection of Scientific Papers ICSAF*, 10, 103-116
- Grundlingh, M. L., & Lutjeharms, J. R. E. (1979). Large-scale flow patterns of the Agulhas Current system. *South African Journal of Science*, 75, 269–270.
- Hardman-Mountford, N. J., Richardson, A. J., Agenbag, J. J., Hagen, E., Nykjaer, L., Shillington, F. A., and Villacastin, C. (2003). Ocean climate of the south east Atlantic observed from satellite data and wind models. *Progress in Oceanography*, 59, 181–221.
- Lass, H.U., M. Schmidt, V. Mohrholz, and G. Nausch. (2000). Hydrographic and current measurements in the area of the Angola-Benguela front. *Journal of Physical Oceanography*, 30, 2589-2609.
- Meeuwis, J.M. and J.R.E. Lutjeharms, (1990). Surface thermal characteristics of the AngolaBenguela front. *South African Journal of Marine Science*, 9, 261-279.
- Moroshkin, K.V., Bubnov, V.A., Bulatov, R.P. (1970). Water circulation in the eastern South Atlantic. *Oceanology* 10, 27–34.
- O'Neill, L.W., Chelton, D.B., Esbensen, S.K. (2003). Observations of SST-induced perturbations of the wind stress field over the Southern Ocean on seasonal timescales. *J. Climate* 16, 2340–2354.
- Ostrowski, M., da Silva, J. C. B., Sangolay Bazik, B. (2009). The response of sound scatterers to El Niño and La Niña-like oceanographic regimes in the southeastern Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1063–1072.
- Roualt, M. (2007). The changing state of the Benguela Current Large Marine Ecosystem: Expert Workshop on CLIMATE Change and Variability and Impacts There of in the BCLME region, 15-16th May 2007.
- Shannon, L.V. (1985). The Benguela Ecosystem, I., Evolution of the Benguela, physical features and processes. *Oceanography and Marine Biology*, 23, 105-182.

## Regimes de transporte costeiro na margem sul da ilha da Madeira

J. C. Reis (1,2), G. Silva (1,2), C. C. Azevedo (1,2) e R. M. A. Caldeira (1,2)

- (1) Observatório Oceânico da Madeira, Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação Tecnologia e Inovação, Funchal, Madeira, Portugal.
- (2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

**Resumo:** A caracterização dos regimes de transporte costeiro é essencial para a compreensão e gestão das atividades antropogénicas que se desenvolvem na costa das ilhas. Este trabalho foca-se no estudo das correntes costeiras da margem sul da ilha da Madeira, bem como no impacto que estas podem ter nos regimes de transporte de sedimentos, poluentes e/ou organismos. Foram utilizados dados *in-situ* provenientes de ADCPs, boias derivantes, bem como dados de deteção remota medidos por radares HF e por satélites (Landsat / Sentinel). Os resultados revelaram a formação de uma corrente, paralela à costa, distinta da(s) corrente oceânica. Esta corrente induz a retenção de sedimentos ao longo da costa sul, manifestando-se à superfície com pelo menos um ponto de convergência / divergência. As imagens de satélite, bem como a trajetória das boias derivantes, confirmam esta zona de retenção costeira.

**Palavras-chave:** correntes costeiras, dados *in-situ*, Landsat.

### 1. INTRODUÇÃO

A ilha da Madeira encontra-se no Atlântico Norte - 32.74°N e 17.00°W e devido à sua localização, está sob a influência da Corrente dos Açores (AC). A interação desta corrente com a ilha é feita através de filamentos/bifurcações (Fig. 1), que se deslocam para sul (Klein e Siedler, 1989) e/ou, através de 'eddies', que se desprendem da mesma corrente (Kielman e Kase, 1987). Esta corrente, que provém, em média, de noroeste, ao colidir com a plataforma insular, é modificada.

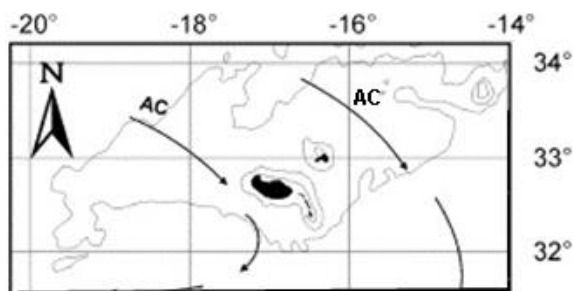


Fig 1 . Representação esquemática das bifurcações da Corrente dos Açores que afetam o Arquipélago da Madeira (Adaptada de Mittelstaedt, 1991).

Este estudo tem como objetivo principal a caracterização dos regimes de transporte costeiro a sul da ilha. Para esse intuito, foram utilizados vários métodos de recolha de dados *in-situ* como ADCP's e boias derivantes. Foram ainda utilizados métodos de deteção remota, como imagens de satélite Landsat e radares de alta frequência ('HF- High Frequency'). Para caracterizar a variabilidade espaço-temporal, recorreu-se ao método das funções empíricas ortogonais (EOF), que permitem calcular os padrões predominantes.

### 2. DADOS E MÉTODOS

#### 2.1 Dados *in situ*

Na aquisição dos dados *in situ* foram utilizados dois métodos distintos. No caso das boias derivantes, com um lastro a 15m, foram colocadas à deriva na costa sul da ilha em diferentes locais entre as batimétricas dos 100 e 1000 m. Cada campanha teve uma duração de 12 h. Através da derivada da posição no tempo, foi possível obter mediadas de 10 min da velocidade da corrente à superfície (i.e. 1.5m). Estas campanhas decorreram ao longo do ano 2016, até finais de 2017, e acumularam um total de 532h de registos (Fig. 2).

O ADCP 'Workhorse-150' da RDI acoplado ao casco do navio B/O SOCIB, utilizado durante a campanha oceanográfica OOM-2017 foi o segundo método de recolha de dados. Por conter um transdutor de 150 KHz, foi possível obter perfis de correntes até a um máximo de 400m de profundidade. A configuração utilizada durante a campanha permitiu obter registos de 50 células de profundidade ('bins'). Os registos foram iniciados aos 17m de profundidade e tiveram um espaçamento de 8m ('bin-size'). Os dados obtidos correspondem a médias de 2 min. Foram efetuados transectos paralelos à costa na batimétrica dos 1000 m. Para o processamento destes dados foi utilizado o *software* do CODAS ADCP Processing ('Common Ocean Data Access System', [https://currents.soest.hawaii.edu/docs/adcp\\_doc/](https://currents.soest.hawaii.edu/docs/adcp_doc/)). Este *software*, desenvolvido na Universidade do Hawaii, permite subtrair a velocidade do navio aos dados, através do método de 'water-track', obtendo as velocidades das correntes na coluna de água.

#### 2.2 Dados de deteção remota

Os dados do Landsat-8 foram obtidos através da base de dados 'Libra', da USGS Earth Explorer. No processamento, foi utilizado o 'SCP-Semi Automatic

*Classification Plugin*, do QGIS 2.18.15. O *plugin SCP* permite efetuar uma correção atmosférica e ainda utiliza o método *'pansharpening'* em algumas bandas (banda 2 e 7), para obter imagens com uma resolução espacial de 15 m. Posteriormente, é feito um processamento à banda RT\_4, em que se multiplica por 289.29 os valores da banda de forma a calcular a concentração de partículas em suspensão, tal como descrito por Vanhellemont e Ruddick, (2014). Devido à elevada resolução das imagens, este método é considerado adequado para o estudo das zonas costeiras.

Os radares HF estão instalados na costa sul da ilha da Madeira em duas estações, Câmara de Lobos e Calheta, desde julho de 2017. Estas estações emitem um sinal eletromagnético na banda dos 13.5 MHz, o que nos permite cobrir uma área considerável da costa sul da ilha e calcular as correntes da superfície até 100 km da costa, com uma resolução espacial de 1 km e uma resolução temporal de 1 h. Foram utilizadas duas antenas da *'CODAR-Ocean Sensors'* que, através do algoritmo *'MUSIC-Multiple Signal Classification'*, interpretam a informação proveniente da reflexão do sinal com a superfície do oceano (S. Yang 2001)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras evidências da existência de uma corrente costeira na margem sul da ilha ficaram patentes com o resultado das boias derivantes. Observou-se que, quando o ponto de lançamento ficava dentro da batimétrica dos 250 m, estas seguiam sempre trajetórias paralelas à costa em ambos os sentidos, ao longo das 12 h (Fig. 2). No caso em que as boias foram lançadas para fora da batimétrica dos 250 m, observou-se uma interação destas com as correntes oceânicas ao largo, incluindo um vórtice, que se encontrava a sul da ilha.

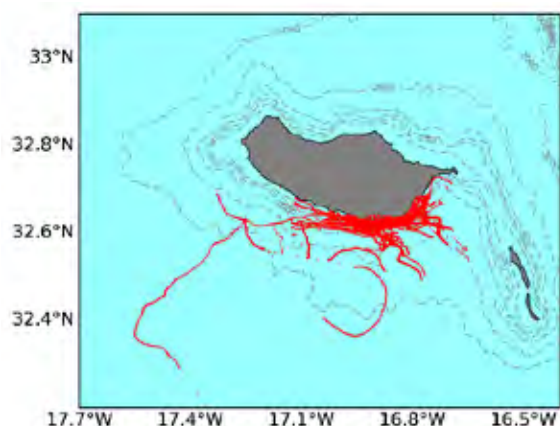


Fig 2. Mapa das trajetórias das boias derivantes entre Julho de 2016 e Dezembro de 2017.

Observa-se, na Fig. 3, as plumas de sedimento provenientes das ribeiras da zona sul da Madeira. Os sedimentos em suspensão junto à costa atingem

concentrações de  $20 \text{ g} / \text{m}^3$ . É visível a sua retenção junto à costa e o seu deslocamento no sentido da corrente costeira (paralelo à costa).

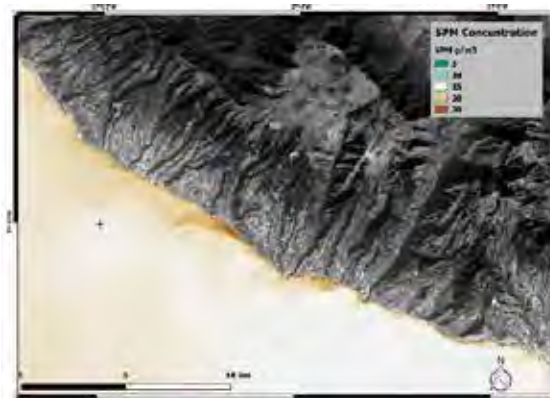


Fig 3. Imagem da concentração de partículas em suspensão em  $\text{g} / \text{m}^3$ , obtida através do satélite Landsat 8, imagem de 10-01-2014.

De forma a estudar a variabilidade temporal da corrente costeira foram calculadas as EOFs dos dados obtidos pelos radares HF. Na Fig. 4 está representado o primeiro modo de variabilidade das EOFs. Este modo representa 46% da variância e mostra que a zona onde há menos variabilidade é junto à costa, sugerindo a predominância da corrente costeira durante todo o período de estudo. Por outro lado, era expectável que a variabilidade fosse maior na zona mais oceânica, já que, quanto mais longe da ilha menor é a proteção desta em relação aos ventos e consequentemente às correntes *'offshore'*. Também observámos que devido às correntes oceânicas serem predominantes de noroeste a variabilidade é menor na zona este da ilha, uma vez que se encontra mais abrigada.

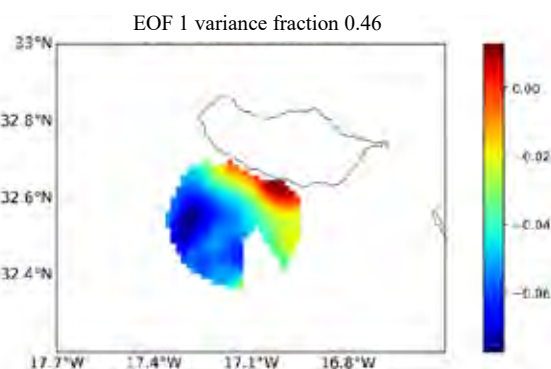


Fig 4. Representação da Primeira EOF da intensidade da corrente obtida pelos Radares HF durante os meses de agosto e setembro de 2017.

As diferenças este-oeste foram igualmente visíveis nos dados das boias derivantes e no ADCP de casco do navio.

Dependendo da distância da costa onde se lançou as boias, observou-se que estas derivavam para oeste ou para este (Fig. 5). No dia 28 de setembro de 2017, foram colocadas boias no raio de ação dos radares HF. Das 5 boias colocadas 3 derivavam para oeste e

duas para este. As boias seguiram as correntes medidas pelos radares.

Analisando os dados de radar em mais pormenor, constatou-se que, por vezes a corrente costeira era interrompida por uma intrusão de correntes oceânicas, provocada por uma convergência das correntes de superfície na zona *offshore*.

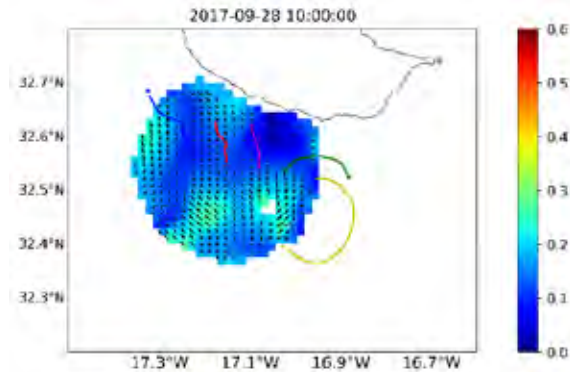


Fig 5. Representação do lançamento das boias em frente à área dos radares HF, trajetória das boias representadas pelas linhas, os pontos representam posição final das boias, direção (vetores negro) e intensidade da corrente ( $\text{ms}^{-1}$ ) obtida pelos radares HF.

Durante a realização da campanha OOM-2017, foram efetuadas medidas com o ADCP junto à costa (Fig. 6-a), com o intuito de observar a corrente costeira.

Na componente  $u$  (ao longo da costa), observou-se que a corrente não é contínua ao longo de todo o transecto (Fig. 6-b). É visível uma corrente este-oeste, entre os 17.3 e 17.1 W; uma corrente oeste-este, entre os 17.1 e 16.85°W; e uma corrente que volta a inverter o sentido para este-oeste até ao final do transecto. A Ponta do Pargo (zona mais a oeste da ilha) está mais exposta às correntes oceânicas. Quanto à Ponta de São Lourenço, extremo este da ilha, é uma zona de formação de ondas internas, em que a maré tem uma forte interação com as correntes costeiras. Com os flancos da ilha a serem zonas de aceleração de ventos (Grubisic *et al.* 2015), o que faz com que os ventos tenham uma maior intensidade e, conseqüentemente, uma maior interação com as correntes, é na região do Funchal que se encontra uma maior intensidade da componente- $u$  da velocidade da corrente.

Nas zonas de descontinuidade da componente- $u$  são observados máximos na componente- $v$  da velocidade (Fig. 6-c), que nos indicam a formação de zonas de convergência de correntes oceânicas que vão em direção à costa. Estas correntes perpendiculares à costa podem ser observadas em diversas regiões ao longo da costa sul da ilha, tendo sido observadas com maior frequência na zona monitorizada pelos radares HF.

Por outro lado, ao comparar as duas componentes, vemos que, mesmo ao longo de toda a coluna de água, a componente- $u$  (aproximadamente paralela à costa) da velocidade é mais intensa do que a componente- $v$

(perpendicular), confirmando de forma independente, a existência da corrente costeira na margem sul da ilha.

Ambas as componentes ( $u,v$ ) registaram o máximo na zona do Funchal, onde foram observados valores de intensidade da corrente de  $0.42 \text{ m s}^{-1}$  a uma profundidade de 41m. Os valores mínimos registados, foram entre a zona da Ribera Brava e Câmara-de-Lobos (17.06°W), com  $0.07 \text{ m s}^{-1}$  a 17m de profundidade.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o regime de transporte costeiro predominante a sul da ilha da Madeira. Sendo a Madeira uma região influenciada pela Corrente dos Açores e pelos fenómenos de mesoescala provenientes desta frente, considerando os dados recolhidos por boias derivantes, ADCP, satélite e radares HF, podemos constatar a existência de diferenças entre a dinâmica de transporte costeira e o regime de correntes oceânicas, 'offshore', sendo que a corrente costeira a sul é influenciada pela plataforma insular. No entanto, existem zonas de convergência que interrompem esta corrente costeira em vários locais.

#### Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Observatório Oceânico da Madeira FEDER-Project (M1420-01-0145-FEDER-000001-Observatório Oceânico da Madeira-OOM). Agradecemos ao SOCIB e à tripulação do seu navio pelo empenho na campanha OOM-2017; à APRAM pelo apoio logístico durante a colocação e recolha das boias derivantes. A CODAR / Qualitas deu apoio técnico na manutenção dos equipamento e processamento dos dados de Radar HF. O projeto MARPOCS, financiou a aquisição das boias derivantes (ECHO/SUB/2015/713854/PREP08).

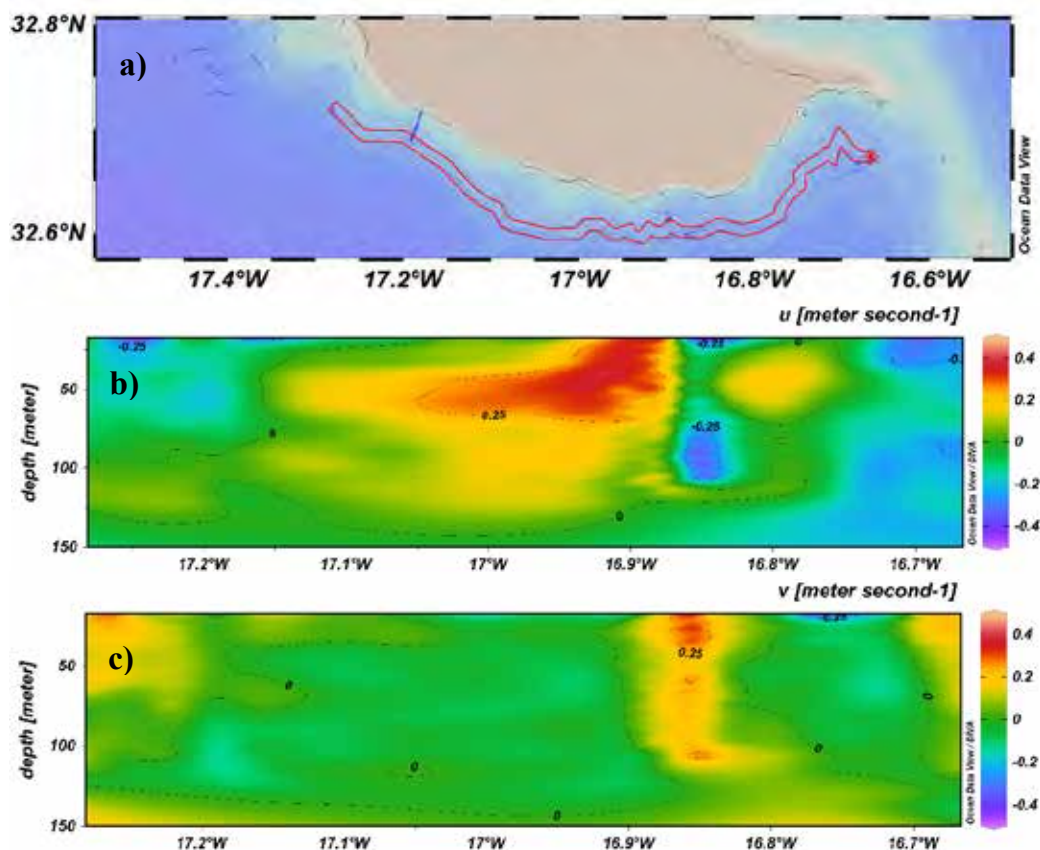


Fig 6. Representação das componentes da corrente, a) mapa do transecto, b) componente-u e c) componente-v

## REFERÊNCIAS

- Kielmann, J., and Käse R. H.. (1987). Numerical modelling of meander and eddy formation in the Azores Current frontal zone. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 529-541.
- Klein, B. and Siedler, G. (1989). On the origin of the Azores Current. *Journal of Geophysical Research*, 94, 6159-6168,
- Mittelstaedt, E. (1991). The ocean boundary along the northwest African coast: Circulation and oceanographic properties at the sea surface. *Prog. Oceanog.* 26, 307-355.
- Vanhellemont, Q., and Ruddick , K. (2014). Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8, *Remote Sensing of Environment*, Volume 145,105-115
- Grubišić, V., Sachsperger, J. and Caldeira, R.M.A. (2015). Atmospheric Wake of Madeira: First Aerial Observations and Numerical Simulations. *J. Atmos. Sci.*, 72, 4755–4776
- S. Yang, H. Ke, J. Hou, X. Wu, J. Tian, B. Wen, (2001) "Detection of the number of signals in super-resolution ocean surface current algorithm for OSMAR2000", The OCEAN MTS/IEEE Conf., 962-966.

## Formação de ‘*salt-fingers*’ na esteira da ilha da Madeira

C. C. Azevedo (1), C. Camargo (2) e R. M. A. Caldeira (1,3)

- (1) Observatório Oceânico da Madeira, Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação Tecnologia e Inovação, Madeira, Portugal.
- (2) Vrije Universiteit de Bruxelles, Department of Ecology and Biodiversity, Faculty of Sciences and Bioengineering Sciences, Belgium.
- (3) Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal.

**Resumo:** A interação dos ventos com ilhas montanhosas induz a geração de vórtices atmosféricos, que, por sua vez, contribuem para remoção de nuvens e consequentemente, exposição da superfície do oceano à radiação solar. Esta exposição resulta num aumento da temperatura da superfície do oceano formando uma esteira de água quente até 100 km da costa, visível nas imagens de satélite. Cerca de 700 perfis de temperatura e salinidade foram utilizados para a caracterização e quantificação da camada difusiva (25-70m) na esteira. Estas camadas difusivas desenvolvem-se quando parcelas de água quente e densa afundam, gerando células de convecção vertical, favorecendo a formação de ‘*salt-fingering*’. O fenómeno foi observado num sector de aproximadamente 30km, na costa sudoeste da ilha da Madeira e validado pelo cálculo do ângulo de Turner e pelo rácio de estabilidade vertical ( $R_p$ ). Em regiões oceânicas expostas ao vento, como as costas sudeste e norte da ilha, este processo termodinâmico não foi tão evidente.

**Palavras-chave:** esteira de água quente, convecção vertical, estabilidade

### 1. INTRODUÇÃO

As esteiras de água quente – ‘*warm water wakes*’ formam-se a sotavento de ilhas montanhosas, quando o vento é fraco e a radiação solar intensa. Caldeira et al. (2002) demonstram que, para a ilha da Madeira, o vento é predominante do quadrante norte, com variações para nordeste nos meses de verão. As montanhas, com cerca de 1500m, geram vórtices atmosféricos que se propagam para sul, removendo as nuvens a sotavento. Desta feita, o vento nos flancos acelera, enquanto que, na esteira da ilha (zona abrigada), tornam-se mais fracos. Com uma menor cobertura nebulosa, a superfície do oceano a sul fica exposta a uma radiação solar mais intensa. Este aumento da radiação solar provoca o aquecimento das águas superficiais e consequentemente, o aumento as taxas de evaporação (Xie et al., 2001), podendo estas atingir os 6 °C de diferença relativamente às águas oceânicas circundantes (Caldeira et al. 2002). A persistência destas condições no período de verão contribui para formar processos de convecção no oceano.

Os processos de convecção são comuns na camada de mistura no oceano (Kantha et al., 2000). Estes podem-se desenvolver devido a uma perda de calor da superfície para a atmosfera e/ou a um aumento na salinidade, causado pelo aumento das taxas de evaporação.

Numa coluna de água estratificada, onde a temperatura e salinidade diminuem com a profundidade e a evaporação domina sobre a precipitação, estão criadas as condições para a formação do fenómeno ‘*salt-finger*’ (Pérez-Santos et

al., 2014). Este fenómeno de convecção vertical ocorre quando parcelas de água mais quente e salina se afundam sobre águas menos quentes e menos salinas, formando pequenas estruturas em forma de ‘dedo’. A propensão para a ocorrência do fenómeno ‘*salt-finger*’ é função da instabilidade criada pelo gradiente vertical de salinidade. Esta instabilidade pode surgir de pequenos gradientes de salinidade, uma vez que a difusividade do sal é duas ordens de grandeza abaixo da condutividade térmica. No que diz respeito às densidades, o gradiente de salinidade criado pela evaporação é cerca de 1/100 do gradiente resultante da temperatura. (Schmitt, 2003).

You (2002) sugere que o fenómeno de formação de ‘*salt-fingers*’ é mais forte no Atlântico Norte do que nos oceanos Pacífico e Índico, sendo as latitudes subtropicais as que apresentam condições mais favoráveis. No entanto, o estudo deste fenómeno tem estado limitado a abordagens laboratoriais e/ou numéricas (Tippins and Tomczak, 2003, Rehman, and Singh, 2017), poucas são as discussões que incluem observações *in-situ* (Schmitt, 2003 e Pérez-Santos et al., 2014).

O principal objetivo deste estudo é a caracterização e quantificação da camada difusiva que se forma na esteira da ilha, bem como a descrição do processo de formação de ‘*salt-fingers*’, com recurso a observações obtidas no âmbito da campanha oceanográfica do Observatório Oceânico da Madeira de 2017.



## 2. DADOS E METODOLOGIA

Num total de 40 estações em torno da ilha, em agosto de 2017, foram coletados cerca de 700 perfis da coluna de água. Neste estudo, foram analisadas as estações da costa sul da ilha (dentro da esteira). Estas foram amostradas com recurso a um ‘CTD-Conductivity, Temperature e Depth’, a um ‘underway CTD (uCTD), ambos com sensores da SeaBird recentemente calibrados, bem como a um ‘VMP-Vertical Microstructure Profiler’ 250, da ‘Rockland Scientific’. Neste trabalho apenas serão apresentados os resultados obtidos através do uCTD.

O uCTD foi operado em modo de ‘TOW-YO’, o que permitiu amostrar a coluna de água da superfície até aos 225m na batimétrica dos 1000m, com alta resolução espacial (perfis cada 1km). A metodologia utilizada no tratamento dos dados recolhidos pelo uCTD consistiu em 2 etapas. Na primeira, foi aplicado o processamento de dados definidos e documentados pela ‘SBE Data Processing’. De seguida, foi feita a representação dos dados com recurso ao software ‘ODV- Ocean Data Viewer’.

De forma a quantificar a estabilidade da coluna de água, foi calculada a frequência de Brunt-Vaisala,

$$N^2 \approx \frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz}$$

onde  $\frac{d\rho}{dz}$  determina a variação da densidade em função da profundidade. Quanto maiores os valores de  $N^2$ , mais estável é a coluna de água. Por outro lado, valores negativos e mais próximos de zero denotam uma camada de água menos estável.

O rácio de estabilidade vertical ( $R\rho$ ) e o Ângulo de Turner ( $Tu$ ) são calculados para identificar os fenómenos de ‘salt-fingers’ e ‘double-diffusion’.  $R\rho$  (Turner, 1973) mede a contribuição da temperatura e salinidade na estabilidade da coluna de água (Tippins and Tomczak, 2003) e é definido por:

$$R\rho = \frac{\alpha^\theta \theta_z}{\beta^\theta (S_A)_z}$$

onde  $\alpha^\theta = -\rho^{-1} \left( \frac{\delta\rho}{\delta\theta} \right)$  representa o ‘coeficiente de expansão térmica’ e  $\beta^\theta = -\rho^{-1} \left( \frac{\delta\rho}{\delta S_A} \right)$  representa o ‘coeficiente de contração salina’;  $\rho$  é a densidade da água do mar,  $\theta$  a temperatura conservativa e  $S_A$  a salinidade absoluta. O índice  $z$  representa a variação vertical das variáveis.  $Tu$ , foi usado por Ruddick (1983), para verificar a existência de fenómenos de ‘salt-fingering’/‘double-diffusion’, bem como para quantificar a influência da temperatura e salinidade na estratificação da coluna de água (Pérez-Santos et al., 2014) e é definido por:

$Tu = \tan^{-1} \left( \frac{R\rho+1}{R\rho-1} \right)$  Assim, quando  $Tu$  varia entre -45 e -90° ( $0 < R\rho < 1$ ) estão reunidas as condições para o desenvolvimento do fenómeno ‘double-diffusion’;

quando  $Tu$  se encontra entre -45° e 45° a coluna de água está estável no que diz respeito à temperatura e salinidade; quando  $Tu$  se encontra entre 45° e 90° logo,  $R\rho$  entre 1 e  $+\infty$ , estão reunidas as condições para a formação de ‘salt-fingering’.

## 3. RESULTADOS

Na Fig. 1 estão representados a temperatura de superfície com a formação da esteira de água quente a sotavento da ilha (a); os gráficos da temperatura (b) e salinidade (c), para um corte longitudinal efetuado na batimétrica dos 1000m a sotavento da ilha da Madeira, representado em (a). Os gráficos (d) e (e) representam as variáveis calculadas, frequência de Brunt-Vaisala e Ângulo de Turner, para o mesmo transecto.

De uma forma geral, a coluna de água mostra-se estratificada, com valores de temperatura mais elevados nas camadas superficiais e diminuindo com a profundidade, em todo o transecto (Fig. 1(b)). Estes valores variam entre 24°C, à superfície, e 16°C a 200m de profundidade. Na zona mais sudoeste do transecto é visível uma massa de água mais quente desde a superfície até cerca de 50m, havendo nessa zona uma maior proximidade das isotérmicas, o que significa um maior gradiente de temperatura.

A salinidade revela uma massa de água mais salina à superfície, 37 (Fig. 1(c)), coincidente com a zona de temperatura mais elevada (Fig. 1(b)). O que também está evidenciado na Fig. 1(c) é o fenómeno de transporte vertical de água salgada devido ao afundamento da água mais densa da superfície. Este fenómeno ocorre praticamente em todo o transecto, sendo mais evidente aos 50 m de profundidade e a sudoeste.

A frequência de Brunt-Vaisala (Fig. 1(d)) mostra 4 camadas distintas de estabilidade ao longo da coluna de água e homogeneidade em todo o transecto. Uma camada superficial mais estável, até aos 7m, com valores de  $N^2$  a variarem entre  $2 \times 10^{-4}$  e  $5 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ ; uma camada intermédia pouco estável, entre os 9 e 40 m com valores muito próximos de 0; seguida de uma camada estável, com valores de  $N^2$  a atingirem os  $5 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$  na zona mais sudoeste; e novamente uma camada menos estável que se estende abaixo dos

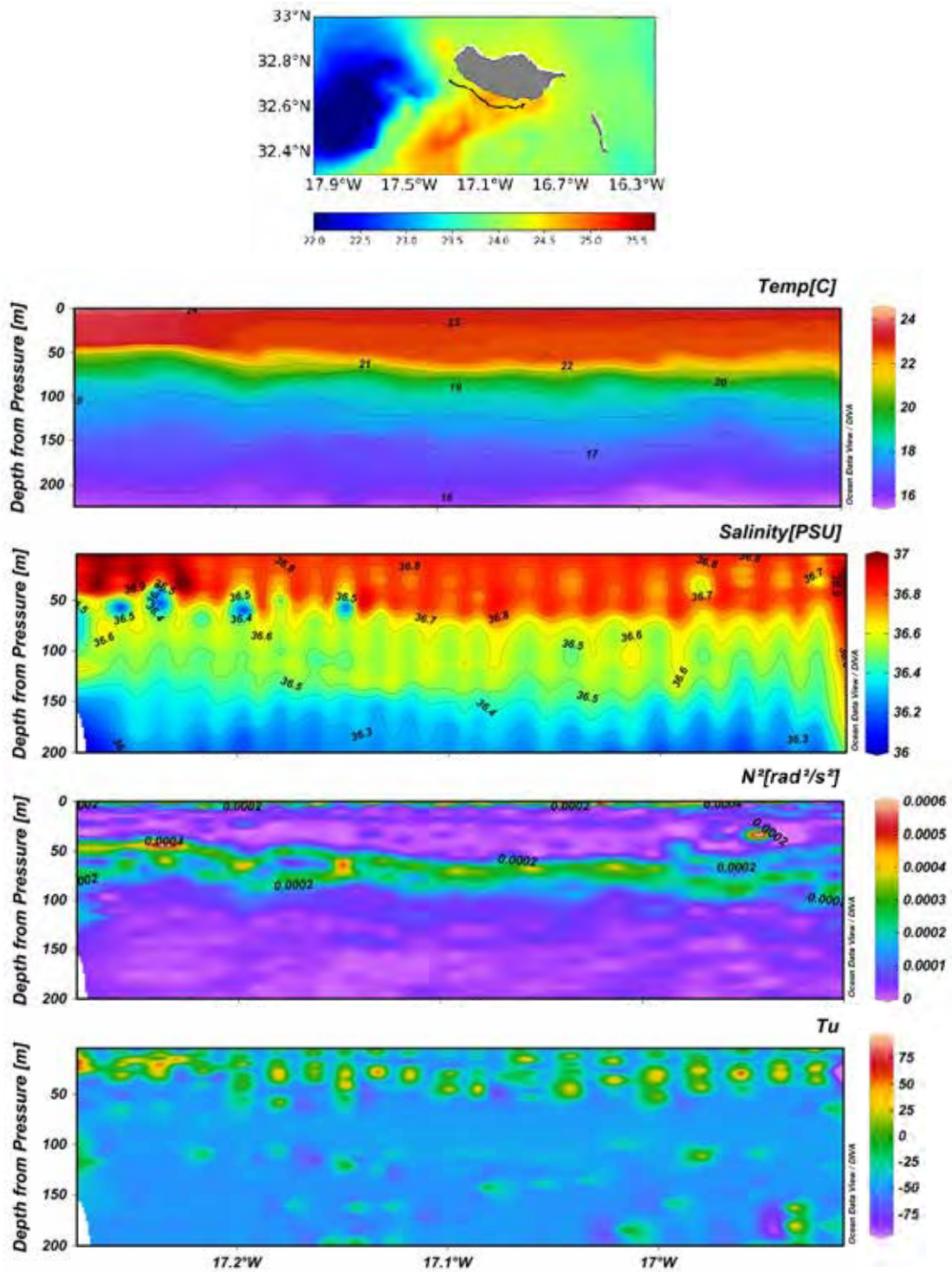


Fig. 1. A partir do topo da figura: (a) Imagem de satélite L4 de SST (Consiglio Nazionale delle Ricerche - Gruppo di Oceanografia da Satellite-CNR-GOS) e corte longitudinal da costa sudoeste da ilha, na batimétrica dos 1000 metros- linha a preto; (b) Temperatura; (c) Salinidade; (d) Frequência de Brunt-Vaisala; (e) Ângulo de Turner.

100m. Nesta última camada, os valores da frequência de Brunt-Vaisala voltam a ser muito próximos de 0.

Na Fig. 1(e) estão representados os valores obtidos no cálculo do Ângulo de Turner em graus. São visíveis 2 camadas distintas. A primeira, entre os 7 e 40m de profundidade, aproximadamente, onde os valores de

Tu variam entre os 40 e 75°, indicando a possível formação de 'salt-fingers'; a segunda, abaixo dos 40m, em que os valores de Tu se encontram, maioritariamente, entre -50 e -25°, significando que a coluna de água é estável no que diz respeito à temperatura e salinidade.

O impacto da estratificação da coluna de água está representado pelo valores elevados de  $N^2$  que coincidem com estratificação mais intensa, isto é, isolinhas de temperatura e salinidade mais próximas, o que significa que, para haver mistura, é necessária uma maior perturbação/energia. Tal é constatado nos gráficos (b) e (d), ou seja, a camada entre os 40 e 70m de profundidade mostra uma estratificação mais intensa, com  $N^2$  a comportar valores entre  $2 \times 10^{-4}$  e  $5 \times 10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ .

A camada entre os 7 e os 40m mostra valores de  $Tu$  correspondentes à formação de ‘salt-fingers’ e, por sua vez,  $N^2$  apresenta valores muito próximos de 0. A formação destas parcelas implica perturbações na interface entre a camada de água mais quente e salgada, com a camada menos quente e menos salina, destabilizando a coluna de água, podendo justificar os valores de  $N^2$  nestas profundidades.

#### 4. MODELO NUMÉRICO

Com o auxílio de um modelo não-hidrostatico 2D (Kampf, 2010), o processo em estudo foi simulado. Considerando uma coluna de água de 100m de profundidade e 1km de comprimento, em que o espaçamento da grelha é regular, equidistante e igual a 5 m (Fig. 2). Inicialmente a coluna de água encontra-se estratificada na temperatura, com a densidade a aumentar com a profundidade (com flutuações máximas de  $10^{-4} \text{ kg/m}^3$ ) e a frequência de Brunt-Vaisala a apresentar valores representativos de estabilidade próximos de  $N = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ; o ‘coeficiente de expansão térmica’,  $\alpha^\theta$ , toma valores de  $2.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  e o ‘coeficiente de contração salina’,  $\beta^\theta$ , é desprezado, Fig. 2(a). No que diz respeito a transferências de calor, para a atmosfera há uma perda de calor de  $Q = 600 \text{ W/m}^2$ , correspondendo a um decréscimo de  $1.2^\circ\text{C}$  por dia. Foram efetuados cálculos cada 1 segundo, no entanto os dados são gravados a cada 3 minutos.

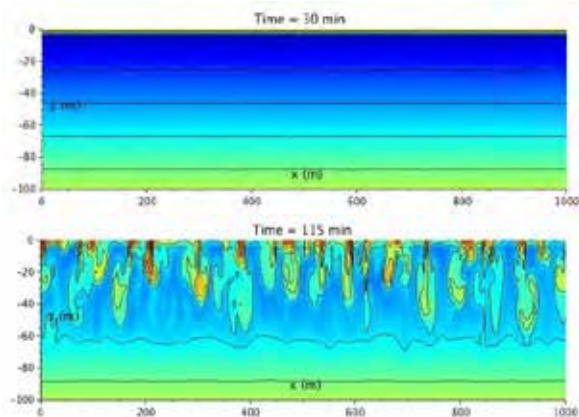


Fig. 2. Representação gráfica da distribuição de densidade, calculada pelo modelo numérico, ao longo do tempo. A figura de cima representa  $t=30\text{min}$ , com a coluna de água estratificada e estável; e a figura de baixo,  $t=115\text{min}$ , apresenta convecção, com os valores da densidade a variar entre 0 e  $0.02 \text{ kg/m}^3$ .

O arrefecimento da superfície do oceano (durante a noite, devido à perda de calor para a atmosfera) cria instabilidade na estratificação antes existente e o processo de convecção começa a formar-se junto da superfície, Fig. 2(a), formando ‘fingers’ de densidades menores e que afundam para profundidades mais elevadas, Fig. 2(b).

#### Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo projeto do Observatório Oceânico da Madeira (M1420-01-0145-FEDER-000001). Agradecemos à tripulação do SOCIB pelo apoio técnico, bem como a todos os intervenientes durante a realização da Campanha OOM-2017. Estamos gratos ao Bruno Ramos e à Emepc – Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental, pela disponibilidade e operação do uCTD durante a campanha.

#### REFERÊNCIAS

- Caldeira, R.M.A., Groom, S. Miller, P. Pilgrim, D. e Nezlin, N.P. (2002). Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 80, 336-360.
- Kampf, J. (2010). *Advanced Ocean Modelling –using open-source software*. Springer, 179 pp.
- Kantha, L. H. e Clayson, C. A. (2000). *Small Scale Processes in Geophysical Fluid Flows. International Geophysics Series*, 67, 888 pp.
- Pérez-Santos, I., Garcés-Vargas, J. Schneider, W. Ross, L., Parra, S. e Valle-Levinson, A. (2014). Double-diffusive layering and mixing in Patagonian fjords. *Progress in Oceanography*, 129, 10.1016/j.pocean.2014.03.012.
- Rehman, F. e Singh, O. P. (2017). Salt finger convection at marginal stability. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 323-332.
- Ruddick, B.R. (1983). A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep-Sea Research*, 30, 1105–1107.
- Schmitt, R. W. (2003). Observational and laboratory insights into salt finger convection. *Progress in Oceanography*, 56, 419-433.
- Tippins, D. e Tomczak, M. (2003). Meridional Turner angles and density compensation in the upper ocean. *Ocean Dynamics*, 53, 342.
- Turner, J.S. (1973). *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press, Cambridge, 367 pp.
- Xie, S.-P., Liu, W. T. Liu, Q. e Nonaka, M. (2001). Far-reaching effects of the Hawaiian Islands on the Pacific Ocean – atmosphere system. *Science*, 292, 2057 – 2060.
- You, Y. (2002). A global ocean climatological atlas of the Turner angle: implications for double-diffusion and water-mass structure. *Deep-Sea Research I*, 49, 2075–2093.

# Uma comparação de métodos para análise de registos de marés

D. Carinhas (1) e P. Infante (2)

- (1) Instituto Hidrográfico; IIFA/Universidade de Évora, dora.carinhas@hidrografico.pt.  
 (2) CIMA/IIFA e DMAT/ECT, Universidade de Évora.

**Resumo:** O movimento regular da maré é constantemente influenciado, a um menor ou maior grau, por efeitos meteorológicos. Em certas regiões do globo, inundações costeiras intensas podem ocorrer quando há a coincidência de fenómenos meteorológicos extremos, como tempestades tropicais ou tufões, com alturas de maré astronómica elevada. As condições meteorológicas são a principal causa das diferenças entre alturas de maré previstas e observadas, fazendo-se notar com maior intensidade nos períodos de Inverno. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão das principais metodologias de modelação e previsão de marés que provaram ser bem-sucedidas numa variedade de circunstâncias. Esses métodos incluem técnicas padrão de filtragem, como por exemplo filtros de Kalman, redes neuronais artificiais e métodos de análise por *wavelets*. Os métodos clássicos e os mais recentes foram revistos de forma sistemática e consistente, apresentando vantagens e desvantagens.

**Palavras-chave:** Marés, Modelação estatística, Previsão.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos oceanos a maré traduz-se no movimento vertical da subida e descida da superfície livre e no escoamento horizontal das correntes devidas à atração exercida, principalmente, pelo Sol e pela Lua sobre a Terra. A maioria dos lugares sofre duas marés altas e duas marés baixas em cada dia (maré semidiurna). Os tempos e a amplitude das marés são influenciados pelo alinhamento do Sol e da Lua, pelo padrão de marés no oceano profundo e pela forma do litoral e batimetria perto da costa.

Os métodos convencionais de previsão de marés são baseados em análises harmónicas usando o método dos mínimos quadrados para determinar os parâmetros harmónicos. Os movimentos relativos da Terra, Lua e Sol provocam um número elevado de forças periódicas geradoras de maré. As variações da altura de água associadas podem ser representadas pela soma de um número finito de termos harmónicos aos quais se dá o nome de constituintes harmónicas (CH) da maré. As CH não dependem do tempo e, sendo típicas de cada porto, constituem a base fundamental para a caracterização da maré num dado local sendo que delas depende a boa qualidade das previsões. Dá-se o nome de análise harmónica ao processo matemático através do qual a maré observada num dado local é separada em constituintes harmónicas simples. A sua finalidade é determinar a amplitude  $H$  (em metros) e a fase  $g$  (em graus) das diferentes constituintes harmónicas da maré, a partir da série de alturas de maré registadas. Na prática, as CH vão ser calculadas como sendo os parâmetros da fórmula harmónica que melhor se ajusta à série temporal para cada porto. A importância da fórmula harmónica deve-se à sua universalidade, ou seja, serve para qualquer tipo de maré. A previsão de maré faz-se igualmente recorrendo à fórmula harmónica, sendo usado o nível médio adotado no lugar  $A_0$ . O

programa de previsão utilizado no Instituto Hidrográfico utiliza 62 constituintes da maré astronómica. Devido a obras portuárias e fenómenos como a erosão e os assoreamentos, as características da maré num dado local sofrem atualizações ao longo do tempo, pelo que é de extrema importância a renovação frequente das CH (Pugh, 1987). Além disso, os métodos harmónicos tradicionais dependem de modelos baseados na análise de componentes astronómicas e podem ser inadequados quando a contribuição de componentes não-astronómicos, como o clima, é significativa. Outras abordagens alternativas foram desenvolvidas na literatura para lidar com essas situações e fornecer previsões com a precisão desejada, respeitando também o comprimento do registo de maré disponível (Pugh, 1987).

## 2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

### 2.1. Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um eficiente filtro recursivo que estima o estado de um sistema dinâmico linear a partir de uma série de medições ruidosas (Kalman, 1960).

A partir de valores iniciais, pode-se prever e ajustar os estados (parâmetros que variam no tempo) do modelo em cada nova medição, obtendo-se a estimativa do erro em cada atualização. A sua capacidade para incorporar os efeitos de erros e a sua estrutura computacional fazem com que este filtro tenha um amplo campo de aplicações, como visão computacional, navegação e posicionamento, meteorologia, economia, processamento digital de imagens, entre outros (Welch e Bishop, 2006). Em alguns aspetos, o problema de previsão do nível do mar é um candidato ideal para a filtragem de Kalman.

A aplicação mais convencional deste filtro destina-se ao problema geral de se estimar um vetor-estado de um tempo discreto num processo explicado pela

Equação (1), que possui uma medição de acordo com a Equação (2) (Welch e Bishop, 2006).

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (1)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2)$$

Nestas equações  $x_k$  e  $x_{k-1}$  representam os vetores de estado a serem estimados, das épocas  $k$  e  $k - 1$  (filtro e previsão) respetivamente;  $z_k$  é o vetor das observações, equivalente ao tempo atual  $k$ ;  $u_{k-1}$  é o vetor de variáveis de controlo de entrada;  $w_{k-1}$  e  $v_k$  representam os ruídos de estado e de medida, respetivamente, com distribuição normal e independentes;  $A$  é a matriz de descrição do estado no tempo anterior  $k - 1$  para o estado atual  $k$ ;  $B$  é a matriz de demonstração do controlo da entrada ao estado atual; e  $H$  é a matriz Jacobiana que descreve o estado para a medida  $z_k$ .

Welch e Bishop (2006) explicam que o Filtro de Kalman se divide em duas fases dentro da interação: a fase da previsão e a fase da correção. Na primeira fase, as equações atualizam e projetam com antecedência as estimativas da covariância do erro do estado atual, para obter as estimativas *a priori* para a próxima etapa. A fase de correção melhora as equações de atualização da variável e incorporam uma nova medida na estimativa *a priori*, para obter, a posteriori, um valor melhorado. As equações (3) e (4) compõem a fase de previsão, enquanto que as equações (5), (6) e (7) representam a fase de correção, permitindo que o algoritmo do filtro se comporte conforme apresentado na Figura 1.

$$x_k^- = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (3)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + BQB^T \quad (4)$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5)$$

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - Hx_k^-) \quad (6)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (7)$$

Nestas equações o sobrescrito representa o valor do parâmetro previsto;  $P_k$  é a matriz de estimativa da covariância do erro do estado;  $Q$  é a matriz de covariância do ruído do processo;  $R$  é a matriz de covariância do ruído das medidas, que indica a qualidade das observações;  $K_k$  representa a matriz do ganho de kalman para o vetor-estado; e  $I$  representa uma matriz identidade do ganho igual ao número de parâmetros a estimar.

Os modelos do nível do mar podem ser colocados na forma de espaço de estado sob alguns pressupostos, sendo a principal restrição a linearidade do modelo.

Um modelo adaptativo de previsão de maré de tempestade baseado no filtro de Kalman foi desenvolvido e aplicado ao porto interno de Macau (Mok *et al* 2016). O modelo foi testado com 40 casos de maré de tempestade induzida por ciclones tropicais. Previsões de até 3 horas apresentaram bons resultados. Contudo, quando o prazo de previsão se tornou mais longo para as 6 horas e as 9 horas, a

precisão do modelo diminuiu. Por conseguinte, o presente modelo é útil para alguns casos, como por exemplo, pequenas cidades como Macau, quando o aviso de aviso de cheias com um prazo de 3 horas é suficiente (Choi *et al*, 2000).

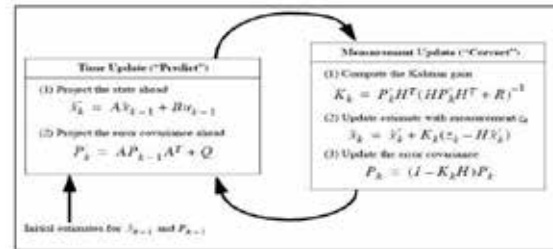


Fig. 1. Operação do filtro de Kalman (Welch e Bishop, 2006)

## 2.2. Transformada Wavelet

A transformada *Wavelet* é uma ferramenta matemática usada na análise de sinais. A transformada *wavelet* decompõe um sinal no número de sub-sinais de diferentes bandas de frequência. As técnicas de processamento de sinal anteriores, tais como a transformada de Fourier (FT) e a transformada de tempo curto de Fourier (STFT) têm grandes desvantagens em termos de informação de tempo e também em alta resolução. Na análise *wavelet*, o uso de uma janela modulada totalmente escalável resolve os problemas acima mencionados. Como na análise *wavelet*, a janela ou *wavelet* mãe é deslocada em todas as posições do sinal. Consequentemente, é possível calcular o espectro em cada posição do sinal. Basicamente, existem dois tipos de transformações *wavelet*: transformação de *wavelet* contínua e transformação *wavelet* discreta.

### 2.2.1. Transformada de Wavelet Contínua

A transformada contínua de *wavelets* (CWT) é definida em termos de dilatações e translações de uma função *wavelet* mãe e pode ser expressa como (Zhou, 2008; Kisi, 2009)

$$W_{\psi}f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$

O sinal transformado é uma função de duas variáveis  $a$  e  $b$ , parâmetro de escala e de translação, respetivamente,  $\bar{\psi}$  denota o complexo conjugado de  $t$ ,  $f(t)$  é o sinal de entrada, função de transformação, chamada de *wavelet* mãe.

### 2.2.2. Transformada de Wavelet Discreta (DWT)

Como CWT produz  $N^2$  coeficientes de um conjunto de dados de comprimento  $N$ , informações desnecessárias são bloqueadas dentro dos coeficientes, o que pode ou não ser uma propriedade desejável (Rajae *et al.*, 2011). Considerando que ao usar a DWT é possível superar a dificuldade acima esta calcula coeficientes de *wavelet* em escalas discretas e posições no tempo

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t-b_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (9)$$

As grandezas  $m$  e  $n$  representam números inteiros que controlam a dilatação e a translação *wavelet*, respetivamente;  $b_0 > 0$  é o parâmetro de localização;  $a_0 > 1$  é uma etapa de dilatação fixa específica. As escolhas apropriadas para  $a_0$  e  $b_0$  dependem da função *wavelet*. A equação (9) pode ser escrita em notação mais compacta

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - n) \quad (10)$$

Para uma série temporal discreta  $x_t$ , onde  $x_t$  ocorre em tempo discreto, a transformada *wavelet* diádica torna-se

$$W_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_{t=0}^{N-1} \psi(2^{-m}t - n) x_t \quad (11)$$

onde  $W_{m,n}$  é o coeficiente *wavelet* para a *wavelet* discreta de escala  $a = 2^m$  e localização  $b = 2^m n$ . A equação acima considera uma série temporal finita,  $x_t$  com  $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$  e  $N$  é uma potência inteira de 2 ( $N = 2^M$ );  $n$  é o parâmetro de translação do tempo. Os intervalos de  $m$  e  $n$  são dados, respetivamente, por  $0 < n < 2^{M-m} - 1$  e  $1 < m < M$ .

A metodologia de análise de marés baseada em transformadas *wavelet* foi proposta, inicialmente, por Flinchem e Jay (2000) e é capaz de fornecer uma análise linear consistente da variação da maré.

É uma técnica de processamento de sinal com a capacidade de analisar a variabilidade de um sinal, quer no domínio da frequência, quer do tempo e permite detetar e analisar sinais não estacionários.

Este método é adequado quando interações de maré com topografia variável podem produzir grandes ondas internas (nomeadamente em rios).

### 2.3. Redes Neurais Artificiais

A rede neuronal artificial (RNA) é um método baseado em dados com estrutura matemática flexível que possui um conjunto interconectado de elementos ou nós de processamento simples, que emula a função dos neurónios no cérebro humano. Possui a capacidade de representar o relacionamento não-linear complexo e arbitrário entre a entrada e a saída de qualquer sistema. Matematicamente, uma RNA pode ser tratada como aproximadores universais, tendo a capacidade de aprender com exemplos sem a necessidade de física explícita. Depois de seleccionar o tipo de rede e o algoritmo de treino, a rede é inicialmente treinada mantendo o Erro Quadrático Médio como um avaliador de desempenho para otimizar os parâmetros como número neurónios, taxa de aprendizagem e coeficiente de impulso.

As Redes Neurais Artificiais foram aplicadas pela primeira vez à previsão das marés usando dados das marés diurnas e semidiurnas por Tsai e Lee (1999).

Lee (2004) aplicaram uma rede neuronal para prever diferentes tipos de marés. No entanto, os seus

métodos dependem de parâmetros harmónicos e não podem prever o nível de maré não-astronómica.

Cox *et al.* (2002) e Lee (2006) abordaram a previsão do nível de maré incluindo componentes não astronómicas.

Lee e Jeng (2002) desenvolveram um modelo avançado de RNA para previsão de marés usando um registo de maré de curto prazo e considerando todas as marés (diurnas, semidiurnas e mistas). Os dados utilizados no estudo dizem respeito a três portos de Taiwan.

### 2.4. Wavelet-RNA combinado

Depois de dividir os dados no conjunto de treino e no conjunto de teste, esses conjuntos de dados são então alimentados para a transformação discreta de *wavelets* como entradas para obter os coeficientes DWT. Para realizar a análise de *wavelets* são seleccionadas as *wavelets*-mãe. A função da transformação de *wavelets* discreta serve para discretizar os dados de altura da maré (Hs Data) não estacionários em sub-sinais estacionários, com o objetivo de separar as propriedades periódicas. Depois de obter os coeficientes DWT, a tarefa seguinte é treinar a rede neuronal usando esses coeficientes como entrada e alvo. Uma vez que a rede é treinada neste padrão, durante a simulação ou estágio de teste, a rede fornece saída apenas como coeficientes, mas não como Hs. Para obter os Hs, os coeficientes de saída da RNA são reconstruídos usando a função *wavelet* inversa.

A Figura 2 ilustra o procedimento para o método combinado *Wavelet*-RNA.

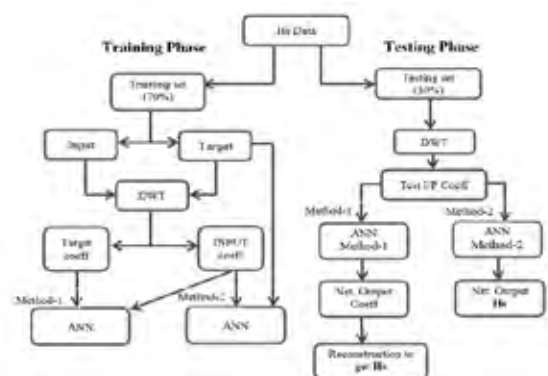


Fig. 2. Fluxograma do método combinado *Wavelet*-RNA (Prahlada e Deka, 2015)

Em Chen *et al.* (2007) é apresentado um estudo, aplicado aos portos de Taiwan, com a combinação *Wavelet*-RNA. Foi desenvolvido um modelo de previsão de marés com resultados bastante satisfatórios, com séries de observações pequenas (3 meses, de janeiro a março), tendo-se obtido previsões a longo prazo (5 anos).

## 3. COMPARAÇÃO DOS MODELOS

As principais características dos modelos apresentados são:

## Filtro de Kalman

- Aplica-se a séries temporais curtas;
- Adequado para situações de tempestade;
- Útil para previsões a curto prazo.
- Inadequado quando a série está incompleta;
- Só permite previsões a curto prazo.

Transformada *Wavelet*

- Aplica-se a séries temporais curtas;
- Adequado para situações de descargas de barragens;
- Permite previsões a curto e longo prazo;
- Adequado para séries incompletas;
- É um método robusto.

## RNA

- Aplica-se a séries temporais curtas;
- Adequado para situações de tempestade;
- Permite previsões a curto e longo prazo;
- Adequado para séries incompletas;
- É um método robusto.

*Wavelet*+RNA

- Aplica-se a séries temporais muito curtas;
- Permite previsões a curto e longo prazo;
- É um método robusto.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo apresentar uma revisão das principais metodologias de modelação e previsão de marés que foram aplicadas numa variedade de circunstâncias.

O próximo passo será aplicar as diferentes metodologias às previsões de marés na costa portuguesa e avaliar a sua qualidade relativamente às previsões efetuadas pelo Instituto Hidrográfico.

## REFERÊNCIAS

- Chen B.F., Wang H.D., Chu C. (2007). Wavelet and artificial neural network analyses of tide forecasting and supplement of tides around Taiwan and South China Sea. Elsevier, *Ocean Engineering*, 34, 2161-2175.
- Choi I.C., Mok K.M., Tam S.C. (2000). Solving harmonic sea-level model with Kalman filter: A Macau case study. *Proceedings of 1st International Symposium on Carbonate Sand Beaches*, Vol 305, 38–52.
- Cox D.T., Tissot P., Michaud P. (2002). Water level observations and short-term predictions including meteorological events for entrance of Galveston Bay, Texas, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 128, n. 1, pp. 21–29.
- Flinchem E.P., Jay D.A. (2000). An introduction to wavelet transform tidal analysis methods. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51, 177–200.
- Kalman R.E. (1960). *A new approach to linear filtering and prediction problems*, *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, vol. 82, series D, pp. 35-45.
- Kisi, O. (2009). Neural networks and wavelet conjunction model for intermittent streamflow forecasting. *ASCE Journal of hydrology*, 14, 773-782.
- Lee, T.L., Jeng, D.S. (2002). Application of artificial neural networks in tide forecasting, Elsevier. *Ocean Engineering*, 29, 1003-1022.
- Lee T.L. (2004). Back-propagation neural network for long-term tidal prediction. *Ocean Engineering*, 31, 225–238.
- Lee T. L. (2006). Neural network prediction of a storm surge. *Ocean Engineering*, 33, 483-494.
- Mok, K.M.; Lai, U. H.; Hoi, K. I. (2016). Development of an adaptive Kalman filter-based storm tide forecasting model. Elsevier. *Journal Hydrodynamics*, 1029-1036.
- Prahlada, R.; Deka, P. C. (2015). *Forecasting of Time Series Significant Wave Height Using Wavelet Decomposed Neural Network*. Elsevier. *Aquatic Procedia*, 4, 540 – 547.
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea Level*. Wiley, 472 pp.
- Rajaei, T., Nourani, V., Kermani, M. Z., Kisi, O. (2011). River suspended sediment load prediction: Application of ANN and wavelet conjunction model. *ASCE J. Hydrologic Eng.*, 16(8).
- Tsai C.P., Lee T.L. (1999). Back-propagation neural network in tidal level forecasting. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* (ASCE), 12, 195–202.
- Welch, G.; Bishop, G. (2016). *An introduction to the Kalman Filter*, TR 95-041 Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill.
- Zhou, H-C., Peng, Y., Liang, G-H. (2008). The research of monthly discharge predictor corrector model based on wavelet decomposition. *Water Resour Manag.* 22:217–227.

# Vórtices na região oceânica de Cabo Frio, RJ - Brasil

Corrêa, D.L.(1), Mill G.N. (1), Costa V.S. (1)

(1) Universidade Federal do Rio de Janeiro - Grupo de Estudos de Processos Oceânicos da COPPE – UFRJ. Centro de Tecnologia - Av. Horácio Macedo, 2030 - 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450. E-mail: danielaleitekkit@gmail.com

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise quantitativa e descrever as características superficiais dos vórtices de Cabo Frio (VCF) em um período de 9 anos (2005 – 2013). Foi realizada uma análise vertical de um dos VCF, calculando-se sua energia cinética e sua energia potencial disponível. No período estudado foram contabilizados 17 VCF, com uma média de 2 vórtices ao ano e um ciclo de vida variando de 16 a 111 dias. O verão foi a estação do ano com maior número de vórtices. As energias cinética e potencial disponível apresentaram valores de  $2,4 \times 10^{15}$  J e  $6 \times 10^{15}$  J, respectivamente.

**Palavras-chave:** Vórtice, Corrente do Brasil, Oceanografia, Sensoriamento Remoto

## 1. INTRODUÇÃO

Na região sudeste brasileira, a Corrente do Brasil (CB) transporta a Água Tropical e Água Central do Atlântico Sul em direção sudoeste, e subjacente a CB há a Corrente de Contorno Intermediária (CCI), a qual transporta principalmente a Água Intermediária Antártica com o fluxo no sentido nordeste. O sistema CB-CCI apresenta um forte cisalhamento vertical e uma recorrente formação de meandros e vórtices na costa sudeste. A atividade de vórtices da Corrente do Brasil é observada na costa sudeste brasileira entre Vitória 20°S e Cabo de Santa Marta Grande 28°S. Estas estruturas de mesoescala são de extrema importância para o desenvolvimento do ecossistema marinho, pois interferem no aumento de biomassa fitoplanctônica e realizam trocas de propriedades químicas e biológicas entre zonas costeira e oceânica, em uma região de intensa atividade de exploração offshore de óleo e gás. Existem diversas hipóteses para explicar a ocorrência, formação e propagação dos vórtices de Cabo Frio. Newton (2013) utilizou como base os dados de satélite de temperatura diários da superfície do mar (TSM) para realizar uma análise quantitativa do VCF no período de 2003-2010. Contudo, devido à alta ocorrência de nuvens na região, a autora não consegue acompanhar o ciclo de vida dos vórtices, nos dados de TSM, desde a sua formação até o seu desaparecimento, considerando então um vórtice diferente a cada imagem de temperatura.

A autora também não realiza nenhuma análise vertical do VCF, por estes motivos, no presente trabalho, as seguintes perguntas foram propostas:

- Quantos vórtices são formados na região por ano?
- Quais são as características superficiais desses vórtices?
- Quais as energias cinética e potencial disponíveis associadas ao VCF?

- Qual é a estrutura vertical do campo de massa do VCF?

## 2. OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa foi realizar um acompanhamento da trajetória superficial do VCF, realizar uma análise quantitativa e descrever as características superficiais do vórtice de Cabo Frio em um período de 9 anos (2005 – 2013). Para tanto, foram elaborados os seguintes objetivos específicos: A- Quantificar a ocorrência do VCF B- Descrever o tamanho, deslocamento, velocidade de translação e ciclo de vida do vórtice C- Realizar uma análise vertical de um vórtice calculando a energia cinética (EC) e energia potencial disponível (EPD) do vórtice.

## 3. METODOLOGIA

Para realizar o acompanhamento superficial do vórtice, utilizou-se campos diários de SLA (Sea Level Anomaly) (AVISO) e TSM (GHRSSST) e campos de clorofila (CLO)(MODIS) com composição de 8 dias a fim de minimizar a presença de nuvens na região. Primeiramente a identificação do VCF foi feita a partir mapas de SLA. A data de início do vórtice foi determinada quando houvesse três isolinhas (a cada 1 cm) de contorno de SLA fechadas, as quais demonstram uma anomalia de superfície superior ao erro do satélite. O fim do vórtice foi determinado quando não houvesse mais três isolinhas fechadas. O raio do vórtice foi calculado a partir da velocidade máxima de rotação.

E para que fosse considerado um vórtice foi necessário que esta feição de mesoescala aparecesse no início da formação conjuntamente aos dados de altimetria, em dados de clorofila e/ou temperatura. O rastreamento superficial dos vórtices foi realizado também com o auxílio do parâmetro Okubo-weiss (Vortmeyer-Kley *et al* 2016). Os dados *in situ* utilizados neste estudo foram provenientes do programa de Circulação de Contorno Meridional do Atlântico Sul (SAMOC). As medições de



temperatura e salinidade estimada referentes ao transecto AX18 são disponibilizadas pelo AOML (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory)-NOAA (Fig.1). A partir de seções de velocidade geostrófica e do campo de massa, pôde-se calcular as energias de um VCF em março de 2008 através do transecto. Seguindo a metodologia aplicada por Mill (2015), adotou-se a isopical de 1026,6 kg/m<sup>3</sup> como referência na integração vertical para o cálculo da EC e da EPD. A fim de calcular a EPD de todos os vórtices de Cabo Frio quantificados no período de 9 anos, utilizou-se o modelo de duas camadas através do cálculo da gravidade reduzida (Schimid *et al* 1995). Neste estudo, utilizou-se como comparação a detecção automática de vórtices de Chelton *et al.* (2011).

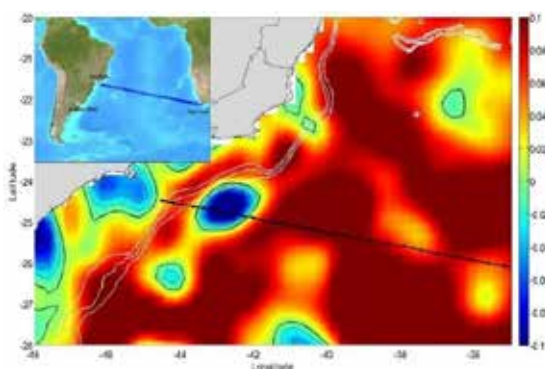


Fig. 1. Localização do transecto AX18 de XBT

#### 4. RESULTADO

Durante o período de 9 anos, 2005 a 2013, foram contabilizados 17 VCF. A média de vida dos VCF no período estudado é de  $\pm 53,4$  dias, sendo a maioria dos vórtices (10 no total) com o ciclo de vida variando entre 20 e 64 dias e 4 vórtices com rastreamento de 3 meses até perderem o sinal (Fig. 2). Os vórtices que apresentaram maior e menor duração ocorreram em 2005 com duração de 111 dias e 16 dias respectivamente. O ano de 2011 foi o único ano do período estudado no qual não houve ocorrência do VCF, em contrapartida, os anos de 2005 e 2012 obtiveram a maior ocorrência vorticial dos 9 anos analisados, registrando a ocorrência de 4 vórtices cada ano. A velocidade média de translação dos 17 VCF foi de 4,5 km/dia com o desvio padrão de 2,5 km/dia, o deslocamento médio foi de 137,6 km, e a média do raio foi de 63 km com o desvio padrão de 6 km. Em relação à sazonalidade, dos 17 vórtices identificados nos 9 anos, o verão foi a estação do ano com maior ocorrência desta feição de mesoescala (6 vórtices), e o inverno foi a estação que obteve a menor ocorrência (3 vórtices).

Compararam-se os resultados obtidos pelo acompanhamento manual dos VCF com o rastreamento automático disponibilizado por Chelton *et al.* (2011). Na análise quantitativa automática foram identificados 14 VCF, havendo uma média de 1,5 vórtice por ano estudado. Assim como neste trabalho,

os VCF identificados por Chelton *et al.* (2011) têm como característica uma propagação pelas linhas batimétricas seguindo o fluxo da CB. A média de vida dos vórtices foi de 60 dias e em relação à sazonalidade, o verão e o outono foram as estações com maior ocorrência de VCF. Detectou-se neste trabalho todos os vórtices que Chelton *et al.* (2011) identificaram no período de 9 anos, entretanto há 3 VCF que o modelo automático do Chelton *et al.* (2011) não detectou em relação a este trabalho. Embora reduzidos no sinal de SLA, esses 3 VCF ficam claros nos mapas de TSM e CLO. O vórtice do qual se obteve dados da estrutura vertical através do XBT, tem início em 27/02/2008 e término no dia 5/06/2008, com uma duração de  $\pm 100$  dias. A partir da seção de temperatura vertical do vórtice, é possível observar as isoterms de forma convexa que caracterizam um vórtice ciclônico ou de núcleo frio. A deformação aproximada das isoterms (Fig. 3) é de aproximadamente 150 metros, quando comparado ao exterior do vórtice. Esta deformação indica a influência do vórtice em profundidades superiores a 800 metros, pode-se afirmar que o vórtice modifica não só a CB como a CCI.

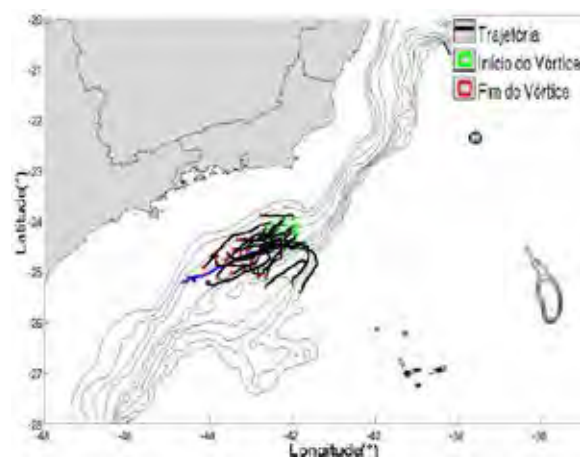


Fig. 2. Acompanhamento da trajetória do VCF

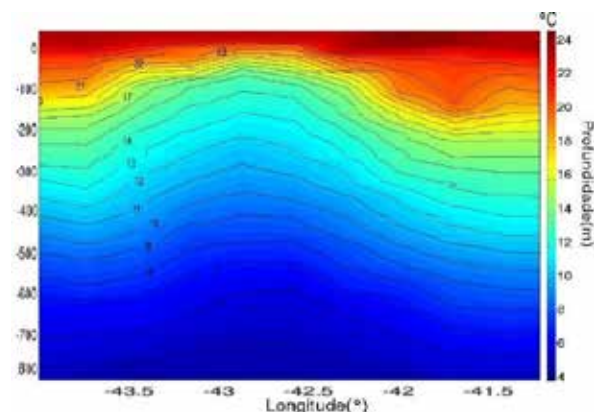


Fig. 3. Perfil de Temperatura do VCF

Utilizou-se para o cálculo da velocidade geostrófica (Fig. 4) o nível de referência de 800 m, devido à alta deformação das isopícnias, e se obteve como resultado velocidades de até 0,8 m/s na superfície. A partir da densidade, da velocidade geostrófica e do

volume do vórtice, calculou-se a energia cinética, a qual teve o valor de  $1,6 \times 10^{15}$  J. E através da profundidade da isopical ( $1026,6 \text{ Kg/m}^3$ ) fora do vórtice e da profundidade da isopical dentro do vórtice, calculou-se a energia potencial disponível, a qual teve o valor de  $4 \times 10^{15}$  J. Como o transecto AX18 não passa no centro do vórtice, foi realizada uma correção linear das energias cinética e potencial disponíveis, e obteve-se os valores de  $2,40 \times 10^{15}$  J e  $6 \times 10^{15}$  J respectivamente. Existe uma variação grande da energia calculada a partir do modelo de gravidade reduzida. A EPD do dado *in situ* foi de  $6 \times 10^{15}$  J e a EPD do modelo de gravidade reduzida para o mesmo vórtice foi de  $2,85 \times 10^{15}$  J.

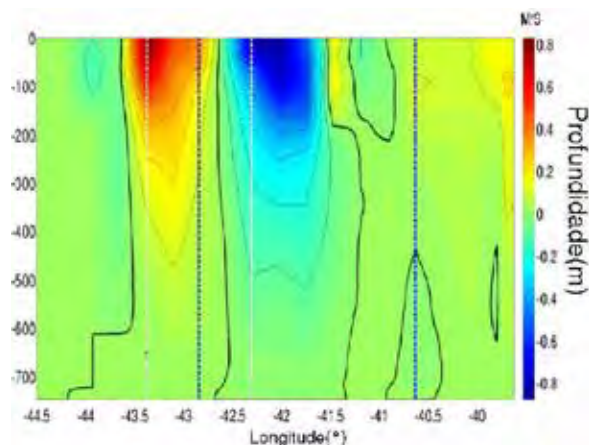


Fig. 4. Perfil de Velocidade Geostrófica do VCF de março, 2008

## 5. CONCLUSÕES

O VCF apresenta uma propagação preferencial em direção sudoeste seguindo o fluxo da CB, deslocando-se ao longo das linhas batimétricas de 500m, 1000m e 1500m de profundidade, não havendo um desprendimento da corrente, corroborando com trabalhos anteriores. Compararam-se os resultados obtidos na análise manual deste trabalho, com a análise automática do Chelton *et al.* (2011), e observou-se que há feições vorticiais que o método automático do autor não identifica. Após ser realizada uma correção linear dos valores das energias do VCF, devido ao fato do transecto passar a 20 km do centro, atingiu-se os valores de  $2,4 \times 10^{15}$  J e  $6 \times 10^{15}$  J para as EC e EPD, respectivamente. Comparando estes valores com os resultados alcançados por Mill (2015) para os vórtices do Cabo de São Tomé, temos que as velocidades máximas geostroficas próximo a superfície atingiram cerca de 0,5 m/s, as energias cinéticas foram em média de  $0,8 \times 10^{15}$  J, e as energias potenciais disponíveis foram em média de  $2,6 \times 10^{15}$  J.

Os resultados de Lima (2017) indicam que os vórtices do Cabo de São Tomé podem ser até 10 vezes mais energéticos que o vórtice de Vitória, descrito por Schmid *et al.* (1995). E os resultados das energias deste trabalho indicam que o VCF seja a feição vorticial mais energética da CB na região sudeste,

influenciando não só a circulação da CB quanto da CCI em níveis intermediários.

## Agradecimentos

Agradecimento ao Grupo de Processos Oceânico da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, aos pesquisadores Alexandre Fernandes e Alessandro Filippo da Universidade Estadual do Rio de Janeiro pelo apoio a este trabalho e ao Doutor Afonso Paiva da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro.

## REFERÊNCIAS

- Newton, T.S., (2013). *Estudo da Ocorrência do Vórtice de Cabo Frio e do Vórtice do Cabo de São Tomé*. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M., (2011), "Global observations of nonlinear mesoscale eddies", *Progress in Oceanography*, v. 91, pp. 167–216.
- Lima, Natalia D' Avila (2017). *A variabilidade de mesoescala ao largo do Cabo de São Tomé*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.
- Mill G.N., Costa V., S,Lima N. D.,Gabioux M.,Guerra L.A.,Paiva A.M. (2015). Northward migration of Cape São Tomé rings, Brazil.
- Vortmeyer-Kley1 , Ulf Gräwe2,3 , and Ulrike Feudel1 (2016). Detecting and tracking eddies in oceanic flow fields: a Lagrangian descriptor based on the modulus of vorticity. *Nonlin. Processes Geophys.*, 23, 159–173.
- Schmid, C.H., H. Schafer, G. Podesta & W. Zenk, (1995). The Vitória Eddy and its relation to the Brazil Current, *J. Phys. Oceanogr.* 25(11), 2532–2546.

# Variabilidade espacial e sazonal da agitação marítima na proximidade da zona de rebentação no arco litoral Caparica-Espichel

F. Sancho (1), M.J. Banha (2) e M.G. Neves (1)

- (1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 LISBOA; fsancho@lnec.pt.  
(2) Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

**Resumo:** Na comunidade científica é ainda controverso o sentido e predominância do transporte sedimentar longilitoral ao longo do arco litoral Caparica-Espichel. No presente estudo analisa-se em detalhe a variabilidade espacial da agitação marítima, média e nos períodos de inverno e verão marítimos, na proximidade da zona de rebentação (em concreto, à profundidade de 5 metros), com base nos resultados da aplicação do modelo SWAN para a retro-simulação de uma série de 65 anos de dados ao largo. Conclui-se que o rumo médio da agitação marítima cresce ao longo deste trecho costeiro, de norte para sul, o mesmo ocorrendo para a altura significativa de onda. A conjugação do rumo da agitação com a direção perpendicular à costa permite concluir, ao contrário da maioria dos estudos anteriores, que a resultante da agitação marítima é maioritariamente dirigida para sul, em todos os períodos, com exceção das extremidades do arco litoral.

**Palavras-chave:** modelo SWAN; deriva litoral; agitação marítima; transporte sedimentar dominante.

## 1. INTRODUÇÃO

De modo a ser possível programar e efetuar uma gestão e defesa costeira eficazes, em zonas de costa arenosa, é fundamental conhecer-se com o máximo rigor possível a dinâmica sedimentar da zona em apreço. Tal inclui a determinação e análise do clima de agitação marítima local, agente dominante do transporte sedimentar longilitoral, e a estimativa dos valores instantâneos, sazonais e anuais médios destes fluxos sedimentares. A longo prazo, a evolução e equilíbrio (ou desequilíbrio) sedimentar de uma célula litoral depende dos fluxos de entrada e de saída longitudinais, e das fontes e sumidouros de sedimentos existentes nessa célula. No comportamento a longo termo a importância das trocas sedimentares transversais à costa, maioritariamente de carácter sazonal ou periódico, é normalmente considerada desprezável, a não ser que induza fluxos permanentes de ganhos ou percas sedimentares na fronteira barlamar ou terrestre da referida célula sedimentar.

No presente trabalho analisa-se, detalhadamente, as condições do forçamento do transporte sedimentar longilitoral, a longo termo, devidas à agitação marítima local, em frente ao arco litoral Caparica-Cabo Espichel, que constitui a costa oeste da península de Setúbal. Efetivamente, o balanço da direção predominante do transporte sedimentar neste arco litoral é tema de controvérsia na comunidade científica. Recentemente, Sancho *et al.* (2017) apresentaram uma súpula das diferentes teorias e resultados preliminares relativos à tendência média anual da direção predominante do transporte.

Resumindo a revisão efetuada por aqueles autores, existem diversas hipóteses relativas à existência ou

não de um ponto no arco litoral oeste da Península de Setúbal a partir do qual, para norte, o transporte litoral se faria predominantemente nesse sentido, e para sul no sentido oposto. Esse ponto, a existir, seria assim um ponto de divergência do transporte longilitoral. Algumas hipóteses apontam para a existência desse ponto imediatamente a sul das praias da Costa da Caparica (e.g., Teixeira, 1990) ou perto da Lagoa de Albufeira (Taborda *et al.*, 2014). Por outro lado, vários autores advogam a não existência desse ponto de divergência e defendem que o transporte longilitoral é dirigido de sul para norte em todo o trecho (e.g., Dias, 1987; Taborda e Andrade, 2014; Taborda *et al.*, 2014).

No presente trabalho estende-se a análise preliminar de Sancho *et al.* (2017), apresentando-se resultados das tendências da direção da agitação marítima e do transporte longilitoral, à profundidade de 5 m. Para tal a direção da agitação marítima foi determinada àquela profundidade, i.e., mais próxima da profundidade onde ocorre a rebentação de ondas (que é da ordem de grandeza do valor da altura significativa de onda) que a profundidade (de 14 m) utilizada no trabalho anterior. Prossegue-se aqui a metodologia anterior, descrita na secção seguinte, e apresentam-se resultados relativos à variabilidade espacial dos valores médios globais e sazonais da altura e direção de onda predominantes, podendo assim inferir-se sobre o sentido do transporte sedimentar longilitoral dominante.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho é igual à apresentada detalhadamente por Sancho *et al.* (2017), e semelhante à aplicada por Taborda *et al.* (2014), em uma das estratégias de modelação

consideradas, utilizando contudo uma série de dados com menor duração que aquela aqui utilizada.

Em primeiro lugar, determinou-se a agitação marítima na proximidade da costa ocidental da península de Setúbal recorrendo ao modelo de propagação de ondas SWAN (SWAN, 2016, versão 41.10). Na Fig. 1, representa-se a zona de estudo e o domínio de cálculo, destacando-se a existência da plataforma continental baixa na embocadura do rio Tejo e a existência do canhão submarino de Lisboa, que promovem a acentuada refração das ondas.

O modelo SWAN foi forçado com condições espacialmente uniformes nas fronteiras marítimas do domínio de cálculo, nomeadamente nas fronteiras norte, oeste e sul (não cobertas por terra). As condições nessas fronteiras foram definidas pela série temporal de agitação marítima resultante da retro-simulação entre 1948/01/01 e 2012/12/31 efetuada por Dodet *et al.* (2010), para o ponto de coordenadas 9.55°W e 38.6°N (em frente à Costa da Caparica), à profundidade de 122 m. Este período de tempo, de 65 anos, foi considerado suficientemente amplo para o cálculo da média e da variabilidade da agitação marítima local na zona de estudo.

Sancho *et al.* (2017) validaram os resultados da simulação com dados obtidos na boia-ondógrafo do Porto de Lisboa para o período de um ano (2012), obtendo desvios(/erros) toleráveis (da ordem de 10(/30) cm para  $H_s$ ).

No presente trabalho, os resultados da modelação foram extraídos em 36 pontos localizados sensivelmente à profundidade média de 5 m, dispostos paralelamente e ao longo da linha de costa (Fig. 2). A seleção da profundidade de 5 m resultou por ser considerada próxima da profundidade de rebentação para ondas com altura significativa da ordem de 2 m. Idealmente, os pontos de extração de resultados deveriam ter sido obtidos à profundidade de rebentação para cada condição de agitação. No entanto, considerando que a rebentação de ondas no SWAN é modelada através de uma função de densidade de probabilidade, resultando numa variável que representa a fração de ondas rebentadas em cada ponto de cálculo, não é assim possível determinar categoricamente a profundidade à qual ocorre a rebentação para cada condição de onda. Assim, os pontos de extração das condições de agitação marítima locais são próximos daqueles onde ocorre a rebentação, sendo, no entanto e em muitas ocorrências, localizados a barlar da rebentação. Para ondas oblíquas à praia, a propagação dessas ondas implicaria uma ligeira redução do ângulo de aproximação da onda relativo à costa na localização da rebentação.



Fig. 1. Trecho costeiro objeto de estudo, com identificação do domínio de cálculo do modelo SWAN e batimetria subjacente.

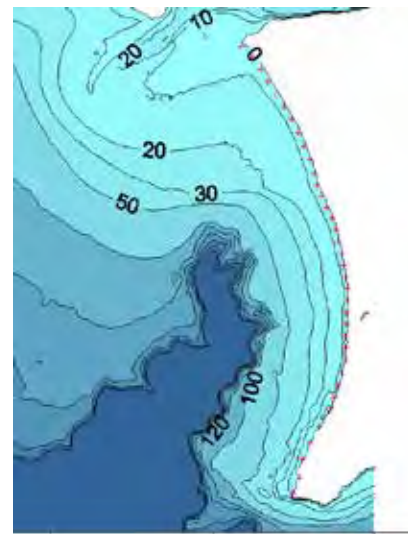


Fig. 2. Pormenor da zona de estudo e localização dos pontos de extração dos resultados (+) à profundidade de 5 m.

Aquando da especificação na entrada do modelo das coordenadas dos pontos de extração ocorreu um ligeiro erro, tendo-se posteriormente verificado, após a execução do modelo, que alguns dos mesmos estavam efetivamente em terra e não à profundidade desejada. Esses pontos (8 no total) foram assim excluídos da análise de resultados. Relativamente aos pontos válidos, a profundidade real média é igual a 5.48 m, com um desvio padrão de 1.14 m. Resulta assim que as condições de agitação determinadas são próximas das que ocorreriam na rebentação, embora não sejam exatas, permitindo, porém, estimar a direção e intensidade do transporte sedimentar longilitoral ao longo da costa. Para esse efeito, considere-se a fórmula CERC (e.g., Mil Homens *et al.*, 2013) para o cálculo do transporte sólido longilitoral,  $Q_L$  (em  $m^3/s$ ), o qual é proporcional a:

$$Q_L \propto H_{sb}^{2.5} \sin(2\alpha_b) \quad (1)$$

em que  $H_{sb}$  (em metros) é a altura significativa de onda na rebentação e  $\alpha_b$  é o ângulo entre a direção de onda e a direção perpendicular à linha de costa na rebentação. Resulta assim que o transporte sólido

litoral é proporcional a uma potência da altura de onda e ao seno do ângulo na rebentação.

Neste trabalho explora-se a variabilidade dos resultados de  $H_s$  e  $\alpha$  à profundidade de 5 m ao longo do arco litoral Caparica-Espichel, assumidos como substitutos dos valores de  $H_{sb}$  e  $\alpha_b$ . A análise conduzida recorre à determinação de médias, máximos, mínimos e desvios padrão das séries totais e das séries sazonais de verão e inverno marítimos. Para estas últimas considera-se inverno marítimo os meses de outubro a março e verão marítimo os meses de abril a setembro.

Os ângulos com o norte das perpendiculares à linha de costa em cada uma das 36 localizações foram determinados recorrendo ao AutoCAD® e posteriormente alisados recorrendo a uma média móvel de 3 pontos, ponderada com a distância ao ponto central. Na Figura 3 apresentam-se estes resultados relativos ao ponto origem, estipulado como o ponto mais a norte da zona de estudo, junto ao esporão sul da Cova do Vapor, sendo a distância à origem dada pela soma das distâncias euclidianas individuais entre pontos adjacentes. Note-se que nestes resultados é visível a alteração da perpendicular à linha de costa na zona próxima da Fonte da Telha devido à protuberância ou saliente aí existente.

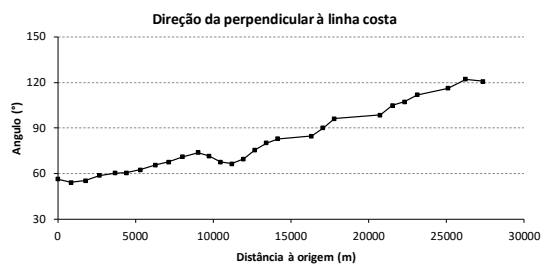


Fig. 3. Evolução do ângulo da direção perpendicular à linha de costa com o norte, ao longo do local de estudo (de norte para sul, correspondendo no gráfico da esquerda para a direita).

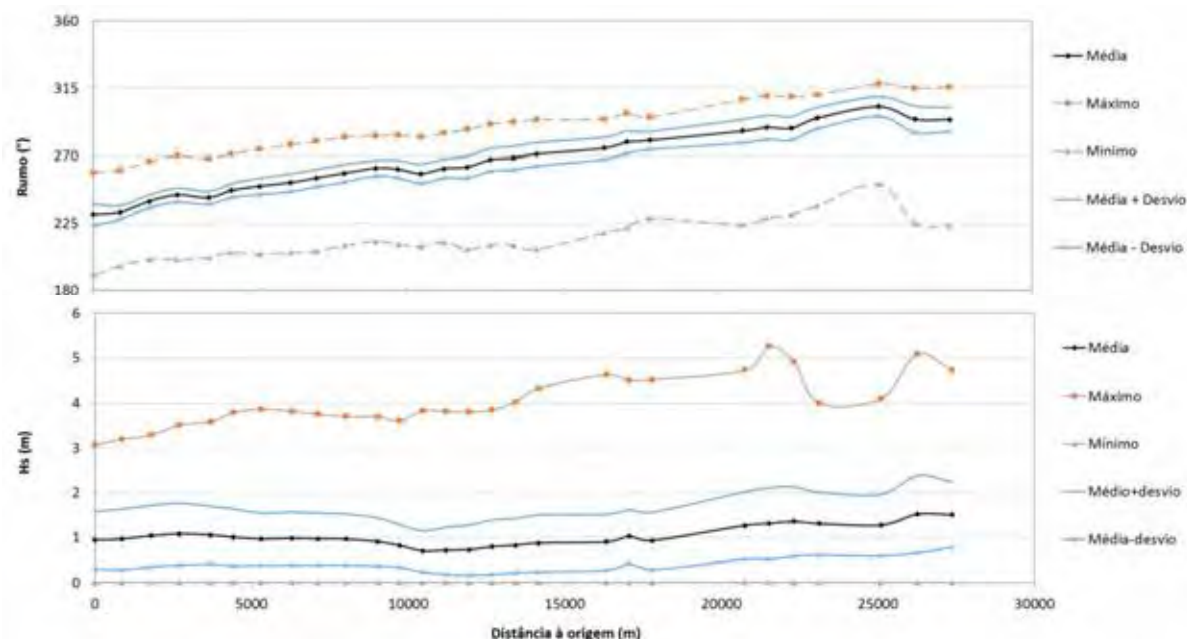


Fig. 4. Evolução do rumo (a) e altura significativa de onda (b) ao longo do local de estudo, de norte para sul.

### 3. RESULTADOS

Na Figura 4 apresentam-se as médias, máximos, mínimos e desvio padrão dos rumos e altura significativa de onda, ao longo da costa (com a mesma origem que a descrita para a Figura 3). Relativamente ao rumo médio da agitação marítima (Fig. 4a), este varia entre 225° e 315°, aumentando progressivamente de norte para sul. O desvio padrão é também menor nos primeiros 10 km, tornando-se posteriormente sensivelmente constante. As curvas de máximos e mínimos acompanham a tendência da curva da média.

No respeitante à altura significativa, a média varia entre 0.7 e 1.5 m de acordo com o representado na Figura 4b. Nos primeiros 10 km observa-se que  $H_s$  é sensivelmente constante e próximo de 1.0 m. O máximo de  $H_s$  cresce para sul, de 3.0 m até 5.25 m.

Na Figura 5 representa-se a direção média da agitação marítima relativamente à perpendicular à linha de costa, obtida pela expressão:

$$\alpha = |\theta - 180| - \tau \quad (2)$$

com os ângulos  $\alpha$ ,  $\theta$  e  $\tau$  em graus. Estes representam, respetivamente, a direção da agitação relativamente à perpendicular à linha de costa, o rumo da agitação marítima e a orientação da costa (Fig. 3). De acordo com a expressão (1), para ondas com  $\alpha > 0$  o transporte sedimentar resultará positivo e dirigido para sul. Contrariamente,  $\alpha < 0$  significa que o transporte será negativo e dirigido para norte.

Genericamente, os resultados de  $\alpha$  médio apresentados na Figura 5 indicam que a tendência média do transporte sedimentar deveria ser dirigida de norte para sul em quase toda a região, com exceção dos primeiros 1000 m (ao longo da praia de S. João) e dos últimos 2000 m.

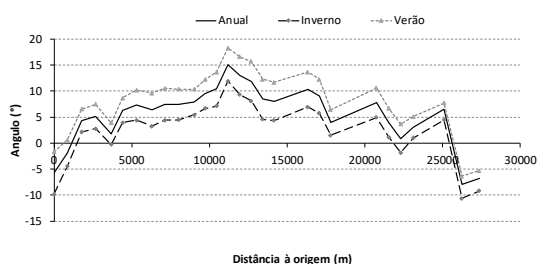


Fig. 5. Evolução da direção da onda relativamente à perpendicular à linha de costa, ao longo do local de estudo: média total, no período de inverno e no período de verão.

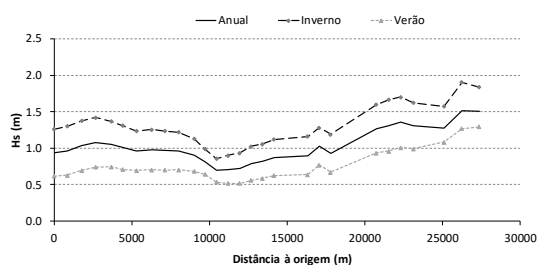


Fig. 6. Evolução da altura significativa de onda ao longo do local de estudo: média total, no período de inverno e no período de verão.

No longo trecho intermédio (com  $\alpha > 0$ ), a direção média varia entre  $0^\circ$  e  $+12^\circ$ . O gráfico da Figura 5 contém ainda os resultados das médias nos períodos de inverno e verão marítimos. Observa-se que no inverno a curva é deslocada para baixo relativamente à curva das médias anuais, e no verão marítimo ocorre o oposto. Significa isso que no inverno aumenta ligeiramente a extensão das zonas (nos extremos do trecho) onde ocorre transporte negativo e dirigido para norte, e o valor médio de  $\alpha$  é reduzido sensivelmente de  $3^\circ$ . Ou seja, no inverno marítimo, em que a agitação é mais intensa (Fig. 6), continua a ocorrer transporte sedimentar maioritariamente dirigido para sul, apesar de com menor incidência que a média para o período global. Estes resultados corroboram genericamente os apresentados por Sancho *et al.* (2017), mas contrariam aqueles obtidos por Taborda *et al.* (2014), onde se conclui que o transporte residual é maioritariamente dirigido para norte. As razões desta grande discrepância deverão ser investigadas pormenorizadamente em trabalhos futuros.

Os valores médios globais, e nos períodos de inverno e de verão marítimos, da altura significativa de onda são apresentados na Figura 6. No inverno,  $H_s$  médio é sensivelmente 30 cm superior à média do período total e  $\sim 60$  cm mais elevada que o valor correspondente no período de verão.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho determinou-se a agitação marítima à profundidade aproximada de 5 m, considerada representativa das condições de agitação na rebentação das ondas, ao longo de todo o arco litoral

Caparica-Cabo Espichel, no período de 1948/01/01 a 2012/12/31.

Pela análise da direção média de propagação das ondas relativamente à costa, no período global e nos períodos de inverno e verão marítimos, conclui-se que o transporte sedimentar médio anual é dirigido para sul na quase totalidade do trecho costeiro, com exceção dos extremos norte e sul. No inverno, a extensão do extremo norte com transporte dirigido para norte é da ordem de 2000 m, abrangendo a Praia de São João e a Praia do Norte. No verão e na média no período global, esta extensão reduz-se para valores de 800 a 1500 m.

Estes resultados contrariam genericamente os de Taborda *et al.* (2014), que resultam de metodologia semelhante, referindo contudo esses autores a enorme sensibilidade da estratégia de modelação adotada no resultado final. Este assunto deverá assim continuar a ser investigado.

#### REFERÊNCIAS

- Dias, J.M. Alveirinho (1987). *Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional*. Dissertação de Doutoramento, 384p., Universidade de Lisboa.
- Dodet, G., Bertin, X., Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31 (3-4): 120-131.
- Mil-Homens, J., Ranasinghe, R., van Thiel de Vries, J.S.M., Stive, M.J.F. (2013). Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. *Coastal Engineering*, Volume 75, 29-39, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.004>.
- Sancho, F., Silva, J., Neves, M.G. (2017). Avaliação e quantificação da intensidade da agitação marítima no arco Caparica-Espichel. 9.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, LNEC, Lisboa, 23-24 de novembro de 2017 (sem paginação, Paper 34), 16 pp.
- SWAN (2016). *SWAN USER MANUAL, SWAN Cycle III version 41.10*. Delft University of Technology.
- Taborda, R., Andrade, C. (2014). *Morfodinâmica do estuário exterior do Tejo e intervenção na região da Caparica – v1*. Contributo para o Grupo de Trabalho do Litoral.
- Taborda, R., Freire de Andrade, C., Nobre Silva, A., Silveira, T.M., Lira, C., Freitas, M.C., Pinto, C.A. (2014). Modelo de circulação sedimentar litoral no arco Caparica-Espichel. *Comunicações Geológicas*, 101, Especial II, pp. 641-644.
- Teixeira, S.B. (1990). *Dinâmica das praias da península de Setúbal (Portugal)*. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 189 pp.

## Análise da variabilidade relativa do Nível do Mar para a região do Algarve

F. Madeira (1) e C. Antunes (1,2)

(1) FCUL – Universidade de Lisboa, fabio.rsmadeira@gmail.com.

(2) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa, cmantunes@fc.ul.pt.

**Resumo:** O recurso a registos históricos dos dados maregráficos provenientes do Marégrafo de Lagos, acoplados aos registos mais atuais, permite a determinação da variação relativa atual do Nível Médio do Mar para a região algarvia. A atualização e monitorização da subida do NMM é de extrema importância devido ao seu impacto sobre a ocorrência de eventos extremos de galgamento, erosão e inundação costeira. As observações efetuadas a partir de marégrafos adjacentes e dados de altimetria de satélite servem como indicadores de validação permitindo comparar a taxa de subida do NMM com a taxa global e regional. Nesta comunicação serão apresentadas as séries temporais atualizadas de dados diários e mensais para o intervalo [1908, 2017], com especial atenção ao período mais recente [2004, 2017], relativamente ao qual serão apresentados valores atualizados resultantes de um conjunto de metodologias que permitem estimar a taxa de subida do NMM e correlacioná-la com a taxa global.

**Palavras-chave:** Marégrafo de Lagos, Nível Médio do Mar, Subida do Nível Médio do Mar, Variação relativa do Nível Médio do Mar.

### 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se assistido a um aumento de ocorrências de fenómenos climáticos extremos, associado à subida contínua da temperatura média do sistema climático da Terra. Deste processo é registado um aumento constante na dinâmica dos oceanos, a partir do qual é possível identificar variações eustáticas com comportamentos significativos, tais como expansão térmica (aumento do volume de massa oceânica) e aumento da massa de água por degelo das massas geladas (calotes polares, permafrost e glaciares continentais), resultando no principal impacto para as regiões costeiras, a subida do nível médio do mar (NMM).

Diversos estudos efetuados recentemente demonstram que a taxa de subida do NMM (sNMM) tem tendência crescente (Jevrejeva et al., 2014). Dada a iminência de galgamentos, erosão e inundação costeira, torna-se necessária a implementação de um conjunto de medidas que visa a monitorização do NMM.

O acesso aos dados, via FTP, dos marégrafos nacionais do Instituto Geográfico Português (IGP), atual Direção Geral do Território (DGT), tem possibilitado a análise sobre a variação do NMM na costa portuguesa. Dado o potencial impacto que a sNMM tem na costa algarvia, torna-se de extrema importância o recurso a registos históricos provenientes do antigo marégrafo analógico [1908, 2000] e, mais recentemente, do marégrafo digital de Lagos [2004, 2017]. Para tal, foi necessário recorrer a várias fontes tais como *Permanent Service Mean Sea Level* (PSMSL) e DGT, com vista à obtenção de um maior conjunto de dados de registos maregráficos.

A existência de lacunas na informação e a inexistência de dados em certos períodos, bem como, registos errados em alguns períodos longos, dificultam o processo de análise e tratamento dos dados. Contudo, a partir de um processo rigoroso de correção e validação dos dados numéricos, desde a georreferenciação de maregramas até à validação numérica, é possível recuperar as séries temporais de forma credível.

A metodologia utilizada para esta análise foca a influência de um conjunto de fatores, como o forçamento meteorológico de curto período sobre os dados recentes. O efeito atmosférico tem grande representação nos dados maregráficos, tendo em conta as constantes ações dos centros de altas e baixas pressões, pelo que a sua remoção leva a uma aproximação mais acertada da taxa de sNMM. O apoio a dados de altimetria por satélite permite a análise da taxa de sNMM no âmbito global e regional, embora possa servir como forma de interpretação e análise numa abordagem local, depois de acauteladas as devidas diferenças.

Neste estudo são apresentados os resultados relativamente à análise maregráfica da série secular de médias mensais para o período [1908, 2000], assim como a série de médias diárias referentes ao período mais recente [2004, 2017]. Será também efetuada, para os anos em comum no último período, uma análise comparativa entre a taxa de sNMM e os dados de altimetria de satélite, provenientes de diferentes instituições, referentes à anomalia do nível do mar.

## 2. SÉRIE MENSAL DO NMM

A análise à série mensal é composta por duas etapas: o tratamento aos dados referentes ao período [1908, 1987] retirados da base de dados do PSMSL e referentes ao período [1986, 2000] fornecido pela DGT.

### 2.1. Origem dos dados e identificação de problemas

Através da base de dados do PSMSL foi possível obter a série temporal de médias mensais no período [1908, 1987]. Os valores de NMM obtidos originalmente possuíam uma referência *Revised Local Reference* (RLR), ao qual era definida como sendo aproximadamente 7000 mm abaixo do NMM, a fim de evitar números negativos nos valores RLR mensais. Uma das limitações associadas a esta série é o facto de apenas conter registo mensais, pelo que a única forma de ter acesso a registo diários é a partir da georreferenciação de maregramas digitalizados. Relativamente aos dados referentes ao período [1986, 2000] disponibilizados pela DGT, foi possível efetuar um tratamento diário e mensal, no qual foram detetadas algumas anomalias para os anos de 1988 e 1989. Os anos em questão apresentavam sobre-elevações na ordem dos decímetros.

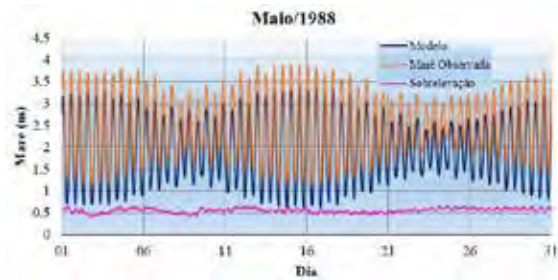


Fig. 1. Gráfico mensal do Marégrafo de Lagos, do mês de Maio de 1988, com maré observada, maré modelada e sobre-elevação (em metros).

A Fig. 1 representa um exemplo do erro detetado. Contudo, por comparação com o modelo de maré astronómica (Antunes, 2007) tal sobre-elevação não é explicável a não ser com erros de referência vertical. Foi efetuado um tratamento numérico restrito, acompanhado por um processo de validação com o apoio de cartas de reanálise de pressão atmosférica, com vista à sua correção de forma a que a série voltasse a ter um comportamento coerente e compatível com os dados dos períodos contíguos.

### 2.2. Série secular

Através da comparação dos anos comuns (1987-88) entre as duas séries (PSMSL e DGT) e de ajustamentos a nível de referencial global da série (NMM de 1908-1917), foi possível completar a série e chegar ao resultado do gráfico da Fig. 2.

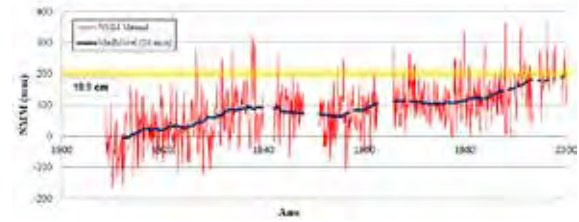


Fig. 2. Série temporal de médias mensais do Marégrafo de Lagos, sobreposta com uma média móvel de 10 anos e respectiva indicação do NMM no período 1908-2000 (em centímetros a amarelo).

## 3. SÉRIE DIÁRIA DO NMM

A análise à série diária do NMM, para o período [2000, 2017] é efetuada a partir dos dados públicos disponibilizados livremente via FTP pela DGT, acrescentada dos anos de [2000, 2003] resultantes de um processo de digitalização realizado a partir de imagens (*raster*) de maregramas disponibilizadas pela Divisão de Geodesia da DGT. Contudo, ao efetuar-se a georreferenciação dos maregramas para este intervalo, observou-se que os anos em questão estavam demasiados incompletos e os dados existentes apresentavam vários problemas a nível técnico do marégrafo.

De forma a obter-se uma maior precisão dos dados diários referentes aos anos mais recentes, foram aplicadas 2 correções, do Efeito Barométrico Inverso (EBI) e da variação sazonal.

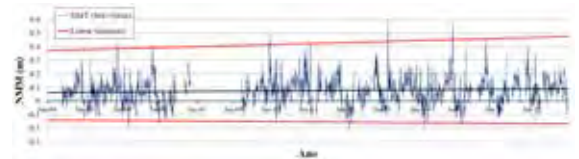


Fig. 3. Série diária do NMM de Lagos (em metros e com desvio padrão, DP, de 10 cm), entre 2004 e 2017.

Os limites máximos e mínimos identificados na Fig. 3, servem para averiguar a tendência de extremos na variação do NMM, nomeadamente a tendência dos máximos correspondentes à ocorrência de temporais. A taxa de sNMM observada é de 1.25 mm/ano, que comparada a outras estações adjacentes para períodos semelhantes, bem como aos dados de altimetria de satélite da zona, demonstra uma clara subestimação.

### 3.1 Correção do forçamento meteorológico

A série de dados da Figura 3 não apresenta qualquer correção meteorológica, pelo que o próximo passo foi reduzir a série do EBI e, os efeitos residuais do forçamento do vento, através da aplicação de uma média móvel.

Inicialmente foi detetada uma deriva instrumental no barómetro digital do marégrafo, facto que causou uma sobrestimação de 2.11 mm/ano. Este problema já tinha sido detetado por Antunes (2016) para o marégrafo de Cascais que, face a este sucedido e antes de ser possível qualquer retificação ou substituição dos valores de pressão atmosférica (PA)



da série, assumiu para o valor de referência da PA a média móvel dos últimos 2 anos em vez do valor médio global dos dados do barómetro do marégrafo. A Fig. 4 mostra a série de médias diárias do NMM corrigida da PA.

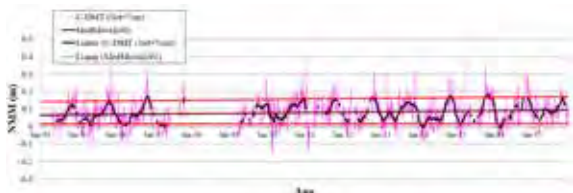


Fig. 4. Série diária do NMM de Lagos (em metros e com desvio padrão de 7 cm) corrigida do EBI e respetiva média móvel de 60 dias.

A média móvel de 60 dias sobreposta à série dá-nos a variação anual do NMM isenta das variações de curto período de forçamento de vento.

### 3.2 Remoção da variação sazonal

A variação intra-anual do NMM (Fig. 5) apresenta um padrão de variabilidade sazonal, na qual se podem observar os valores máximos no último trimestre de cada ano e valores mínimos de março a julho. A variação sazonal da maré de origem astronómica, nomeadamente, a constituinte harmónica anual da maré de influência solar (SA), bem como, a influência de fatores externos (vento, correntes e temperatura da água) é uma componente a ter em conta, que pode e deve ser removida.

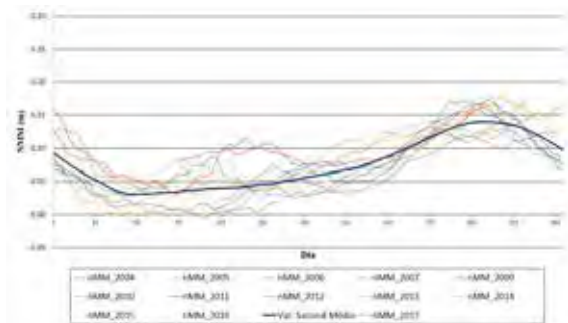


Fig. 5. Variação sazonal (em metros) de 2003 a 2017 e variação média.

A Fig. 5 mostra a variabilidade da variação sazonal dos últimos 13 anos que permite determinar a variação sazonal média do NMM. Ao remover esta variação sazonal média da média diária do NMM corrigida da PA, obtém-se uma série reduzida (Fig. 6) próxima daquilo a que se pode chamar de variação eustática relativa.

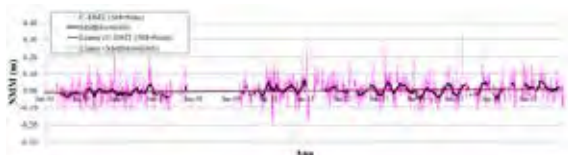


Fig. 6. Série de dados reduzida da variação sazonal (em metros e com 6 cm de DP) e respetiva média móvel de 60 dias com a reta de regressão linear.

Esta série reduzida de variação do NMM apresenta uma variabilidade intra-anual significativamente mais reduzida do que era esperado, da qual se conseguiu extrair uma taxa de sNMM de 2 mm/ano.

## 4. ANÁLISE COMPARATIVA COM ALTIMETRIA DE SATÉLITE E CONCLUSÕES

Dada a correção da variação sazonal da série diária do NMM é possível, através da Tabela I, observar as taxas de sNMM e desvios padrão (DP) para todas as séries atrás referidas. O DP 2.3 cm da série reduzida indica maior estabilidade da estimativa da taxa de sNMM.

Tabela I. Variabilidade (DP em cm) das séries de dados e Taxa de subida do NMM (mm/ano).

Séries	DP Série	Taxa sNMM (mm/ano)	Taxa DP (mm/ano)
Original	9.5	1.3	0.26
Corrigida	7.1	1.6	0.19
MM60_cor	4.6	1.6	0.13
Reduzida	5.7	2.2	0.16
MM60_red	2.3	2	0.06

Comparando o valor referente à série corrigida da variação sazonal, de 2 mm/ano, quer com marégrafos adjacentes (Cascais e Cádiz), quer com altimetria de satélite verifica-se que está subestimado. Este valor baixo poderia estar associado a um processo de maior *uplift* tectónico na zona de Lagos, contrariamente ao que a estação permanente de GPS de Lagos indica, uma subsidência com uma velocidade vertical de -0.5 mm/ano. Contudo, dos dados de neotectónica segundo alguns autores (Figueiredo *et al.*, 2018) para aquela região, encontra-se em processo de *uplifting* com valores de 0.1 a 0.2 mm/ano, por um lado insuficientes para explicar a subestimação face a outras fontes do NMM, por outro contrário ao sentido da taxa de movimento vertical absoluto de GPS.

De forma a tentar perceber esta subestimação, procedeu-se à comparação com dados de altimetria de satélite, a partir do acesso à base de dados da NOAA e CNES (a partir do site AVISO) para obter dados relativos à variação do nível do mar. Em relação aos dados obtidos do site da NOAA, foram escolhidas várias localizações para estimar a variação do NMM ao longo da costa portuguesa com altimetria de satélite, de modo a obter-se uma ideia mais clara do comportamento da superfície do oceano ao longo da costa Portuguesa e sudoeste de Espanha. O período utilizado foi, de acordo com os dados disponíveis, o mais próximo da série em estudo, de 2004 a 2017.

Os locais que serviram como base de validação para observação da variação no nível do mar foram Cascais, Sines, Lagos (Fig. 7), Faro e Cádiz.

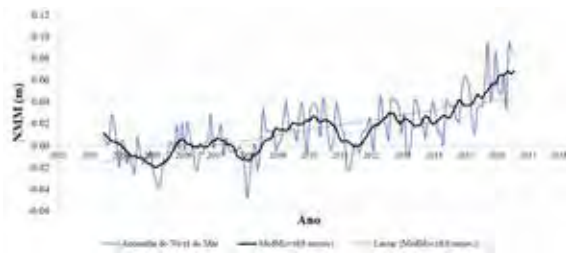


Fig. 7. Série temporal de anomalia do nível do mar, ao largo, para Lagos (em metros) e respetiva média móvel de 6 meses com a reta de regressão linear, no período de 2004 a 2017 (fonte: NOAA).

A partir da Fig. 7 é possível observar-se, ao largo de Lagos, uma taxa de elevação da anomalia do nível do mar de 4.78 mm/ano, que vai ao encontro da tendência global. De modo a provar-se que existe um comportamento similar de variação do nível do mar ao largo dos restantes locais de análise, a Tabela II mostra as respetivas taxas de elevação.

Tabela II. Taxas de elevação da anomalia do nível do mar, ao largo, para Cascais, Sines, Lagos, Faro e Cádiz, em mm/ano.

	Near Cascais	Near Sines	Near Lagos	Near Faro	Near Cadiz
NOAA	3.97	4.61	4.78	3.04	4.23

Os valores observados na Tabela II demonstram uma concordância, não só entre os pontos de estudo, mas também com a taxa estimada para o Atlântico Norte a partir da base de dados do CNES (Fig. 8).

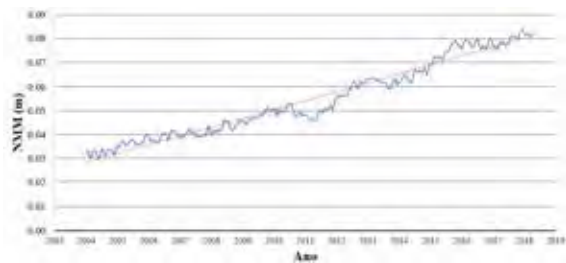


Fig. 8. Série temporal da variação do nível do mar para o Atlântico Norte (em metros) com a reta de regressão linear, no período de 2004 a 2017 (fonte: CNES).

A taxa estimada para o período [2004, 2017] do Atlântico Norte é de 3.73 mm/ano, pelo que é concordante com as várias taxas determinadas anteriormente. Com base na comparação dos valores estimados, entre as entidades NOAA e CNES, com a sNMM para Lagos, pode-se afirmar que não existe uma correlação entre as estimativas regionais e de Lagos. Os valores de altimetria de satélite aqui apresentados permitiram detetar uma subestimação do valor de sNMM para Lagos, de 2.78 mm/ano em relação aos dados da NOAA e de 1.73 mm/ano referente ao CNES. Embora se estejam a comparar estimativas regionais absolutas e relativas, seria, ainda assim, expectável obter uma diferença menor entre as mesmas dado o conhecimento da magnitude de *uplifting* tectónico para a região.

## Agradecimentos

À Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo financiamento através do projeto FCT: “EVREST – PTDC/MAR-EST/1031/2014”.

À Direção Geral do Território, pela cedência e facilitação do acesso aos dados do Marégrafo de Lagos.

## REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa atual. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 21-23 de Junho.
- Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal. FCUL Webpage, [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html).
- Figueiredo, P. M., Rockwell, T. K., Cabral, J., e Ponte Lira, C. (2018). Morphotectonics in a low tectonic rate area: Analysis of the southern Portuguese Atlantic coastal region. *Geomorphology*, DOI:10.1016/j.geomorph.2018.02.019.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A., Matthews, A. P., e Spada, G. (2014). Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807. *Global and Planetary Change*, vol. 113, p. 11-22.

# Relationship between the mean periods of wind-generated and infragravity waves: a sensitivity analysis

D. Mendes (1,2,3), A.A. Pires-Silva (1), J.P. Pinto (3) and A.B. Fortunato (2)

- (1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal. ddiogosm@gmail.com  
 (2) National Laboratory for Civil Engineering, Lisbon, Portugal.  
 (3) Hydrographic Institute, Lisbon, Portugal.

**Abstract:** A sensitivity analysis was performed on the mean infragravity wave period by varying five input parameters associated to short-waves. The mean infragravity wave period was estimated from the short-wave directional spectrum using a second-order wave theory.

The analysis was based on a sensitivity index and showed that the mean infragravity wave period is more sensitive to both the significant short wave height and the mean short wave period than to the water depth, the directional spreading coefficient and the JONSWAP peak-enhancement factor. The maximum value of the mean infragravity wave period obtained (60 s) indicates that larger mean infragravity wave periods might not be forced by the second-order wave theory, thereby depending on the bottom topography.

**Key words:** Infragravity waves, sensitivity analysis, second-order wave theory

## 1. INTRODUCTION

Infragravity waves (IGW) with periods between 25 s and 250 s often dominate the swash spectrum (Guza and Thornton, 1982). Following the mechanism proposed by Longuet-Higgins and Stewart (1962), these IGW are generated by nonlinear interactions between groups of wind-generated short-waves (SW) with periods between 4 s and 25 s. IGW generated by this mechanism are commonly referred as bound IGW.

Several dependencies of the significant IGW height ( $H_{ig}$ ) are well established, such as the significant SW height ( $H_{sw}$ ), the water depth ( $h$ ) and the bottom slope ( $\beta$ ). In general,  $H_{ig}$  increases with an increase in  $H_{sw}$  and a decrease in  $h$ . The growth rate of IGW is also larger over mild than over steep slopes because SW nonlinearities are stronger and occur in a large cross-shore length in the former.

Besides the above-mentioned dependencies, the relationship between the mean IGW period ( $T_{ig}$ ) and the mean SW period ( $T_{sw}$ ) remains unclear (Bertin *et al.*, 2018). As an example, while Bertin and Olabarrieta (2016) measured a  $T_{ig}$  of 60 s under narrow swell conditions characterized by a peak SW period ( $T_p$ ) of 20 s, De Bakker *et al.* (2014) measured a  $T_{ig}$  of 200 s under broad sea conditions with a  $T_p$  of 7 s.

The aim of this study is to perform an analytical analysis on three IGW parameters by varying four parameters associated to SW and  $h$ . In particular, this study aims to understand based on a sensitivity index which SW parameters influence  $T_{ig}$  the most.

## 2. METHODOLOGY

### 1.1. Input and output parameters and sampling strategy

The sensitivity analysis performed in this study considered five input and three output parameters. The input parameters were  $H_{sw}$ ,  $T_{sw}$ ,  $h$ , the directional spreading parameter ( $s_{max}$ ) and the peak-enhancement factor of the JONSWAP spectrum ( $\gamma$ ). The output parameters were  $H_{ig}$ ,  $T_{ig}$  and the IGW frequency bandwidth ( $\nu_{ig}$ ). The workflow is illustrated in Fig. 1.

The input dataset comprised 300 groups of five input parameters. The intervals of variation for  $H_{sw}$ ,  $h$ ,  $s_{max}$  and  $\gamma$  were respectively between 0.5 m and 6 m, 10 m and 100 m, 15 and 75, and 0 and 10. A uniform distribution was used to sample  $H_{sw}$ ,  $h$  and  $s_{max}$ . A Gaussian distribution with a mean of 3.3 and a standard deviation of 0.8 (Ochi, 1998) was used to sample  $\gamma$ . In commonly observed sea-states,  $H_{sw}$  depends on  $T_{sw}$ . Therefore, we used a one-year time series records from the coastal buoy located in Leixões to estimate a relationship between both parameters. The following second-order polynomial relationship was established with a correlation coefficient of 0.69:

$$T_{sw} = -0.082H_{sw}^2 + 1.733H_{sw} + 7.746 \quad (1)$$

### 1.2. Directional short wave spectrum

The calculation of a directional SW spectrum largely followed Goda (2000). Therefore, the reader is referred to this textbook in order to fully understand the equations' numbering presented below.

A uni-directional JONSWAP-Goda type spectrum was calculated for each group of three input parameters associated to SW ( $H_{sw}$ ,  $T_{sw}$  and  $\gamma$ ) using Eq. (2.12) with a frequency resolution of 0.002 Hz and a high-frequency cut-off of 0.5 Hz.

A directional SW spectrum was computed following a  $\cos^2$  directional spreading function. First, we estimated  $s$  using Eq. (2.24) and  $s_{max}$ . Second, we calculated  $G_0$  with Eq. (2.23). Third, we computed  $G$  with Eq. (2.21) for a directional interval between  $-180^\circ$  and  $180^\circ$ . Finally, we obtained a directional SW spectrum with Eq. (2.19).

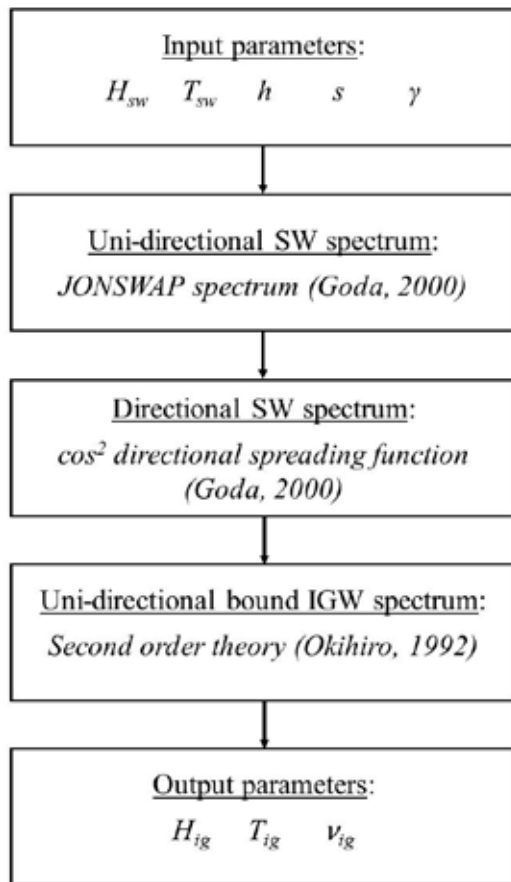


Fig. 1. Workflow of the methodology employed in this study.

Goda (2000) gave different values of  $s_{max}$  parameter based on the type of sea-state. As an example, local wind-generated waves (sea) are associated to a  $s_{max}$  of 10 while distant wind-generated waves (swell) display  $s_{max}$  values between 25 and 75. Consequently, we chose the  $s_{max}$  input parameter to follow a uniform distribution with a minimum value of 10 and a maximum value of 75.

### 1.3. Bound infragravity wave spectrum

The directional SW spectrum is used to estimate the uni-directional bound IGW spectrum following the formulation of Okhiro et al. (1992). This formulation makes use of the second-order wave theory. Lo and Dean (1995) showed that second-order wave theory is valid for a  $H/L > 0.1$ , where  $H$

is the SW height and  $L$  the wavelength. In shallower water depths this theory does not hold and the energy associated to the bound IGW spectrum will be overestimated. Therefore, we chose a minimum  $h$  of 10 m. The three output parameters were obtained from the spectral moments integration associated to the bound IGW spectrum. The integration limits were between 0.002 Hz and  $f_s$  ( $f_s = 1/2T_{sw}$ ).  $\nu_{ig}$  was calculated based on the formulation of Longuet-Higgins (1984). Again, we refer to Fig. 1 for a complete understanding of the procedure delineated above.

### 1.4. Sensitivity analysis

A sensitivity analysis (SA) was performed by using the input and output parameters for each of the 300 groups under study. The SA made use of the freely available SAFE toolbox ([www.safetoolbox.info/](http://www.safetoolbox.info/)). Details of the SAFE toolbox can be found in Pianosi et al. (2015). Here, we made use of a Regional Sensitivity Analysis (RSA) to estimate a sensitivity index.

The procedure used in the computation of the sensitivity index associated to the RSA will be briefly described in the following. The output parameter  $T_{ig}$  will be used as an example. First, a threshold value is chosen for  $T_{ig}$ . In our study,  $T_{ig}$  ranged between 25 s and 75 s and we chose 35 s for the threshold value. Second, the dataset associated to each input parameter was split in two sub-datasets: one associated to values of  $T_{ig}$  smaller than 35 s and the other with values of  $T_{ig}$  greater than 35 s. Third, the cumulative density function was calculated for each sub-dataset. Fourth, the maximum vertical distance between the cumulative density functions of each sub-dataset was used as a sensitivity index. By using this procedure, the sensitivity index displays values between 0 and 1. A value of 0 means that the output parameter is not sensitive to the input parameter. Note that there will be five sensitivity indexes (five input parameters) for each output parameter.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The objective of this study is to improve the understanding of the dependencies associated to  $T_{ig}$ . Consequently, the results and discussion will only regard  $T_{ig}$ .

Fig. 2 shows the relationship between  $T_{ig}$  and each input parameter. A linear dependency is seen between  $T_{ig}$  and  $H_{sw}$  and  $T_{sw}$ . The values of the other input parameters are scattered for different values of  $T_{ig}$ .

Fig.2 also shows a maximum value of approximately 60 s for  $T_{ig}$ . A previous analysis by using a Pierson-Moskovitz instead of a JONSWAP-Goda type spectrum displayed similar results (not shown). Therefore, it seems that bound IGW are relatively short in period and the 200 s IGW periods observed

by De Bakker *et al.* (2014) might not be associated with bound waves, but rather with other types of IGW motions, such as edge waves.

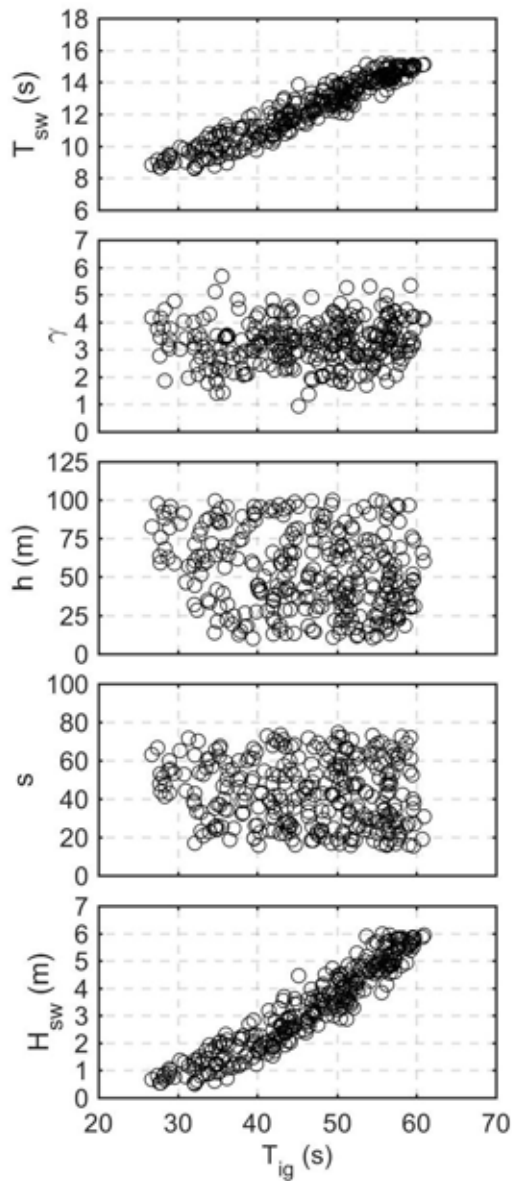


Fig. 2. Relationship between the mean infragravity wave period and the input parameter (from top to bottom) mean short wave period, JONSWAP peak-enhancement factor, water depth, maximum directional spreading coefficient and significant short wave height.

Fig. 3 displays the sensitivity index associated to  $T_{ig}$  for each input parameter. The  $T_{ig}$  is more sensitive to  $H_{sw}$  and  $T_{sw}$  than to the other parameters. We used a threshold value of 35 s for  $T_{ig}$  to make Fig. 3. We further analysed the results for a range of threshold values between 30 s and 50 s in 10 s intervals and the results did not change. Therefore, both  $H_{sw}$  and  $T_{sw}$  are the input parameters that influence  $T_{ig}$  the most.

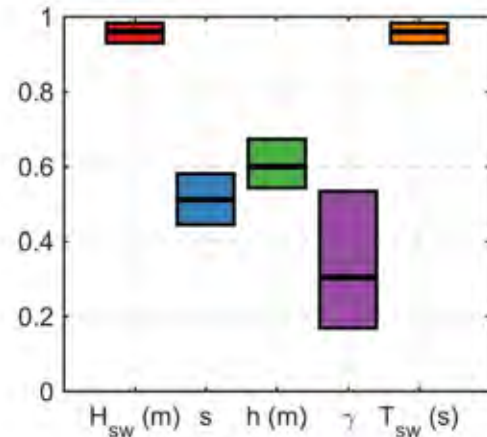


Fig. 3. Sensitivity index and upper and lower bounds of the sensitivity index after bootstrapping of the mean infragravity wave period associated to each input parameter.

Finally, Fig. 4 depicts a convergence plot for each input parameter to assess if 300 groups of input parameters are sufficient. Most of the input parameters seem to display a stable behaviour after approximately 240 groups. Consequently, 300 groups are adequate to perform this sensitivity analysis.

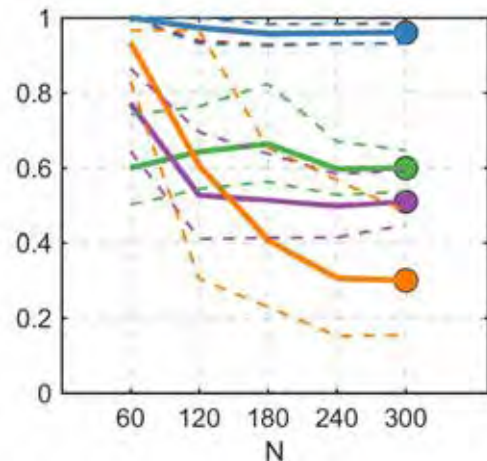


Fig. 4. Convergence associated to the sensitivity index of the mean infragravity wave period associated to each input parameter as a function of the number of input length. Orange, purple, green, blue and red lines indicate  $\gamma$ ,  $s$ ,  $h$ ,  $H_{sw}$  and  $T_{sw}$  respectively.

#### 4. CONCLUSIONS

This study had its focus on a sensitivity analysis to improve the understanding between the mean IGW period and several SW parameters. From this sensitivity analysis, the parameters that most influence the mean IGW period are the significant SW height and the mean SW period. The maximum mean IGW period was 60 s by using a second-order wave theory. Therefore, larger IGW periods ( $O(100)$  s) might be associated to other IGW motions not generated by this theory.

## Acknowledgements

The first author acknowledges a PhD fellowship granted by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (grant PD/BD/114463/2016).

## REFERENCES

- Bertin, X. and Olabarrieta, M. (2016). Relevance of infragravity waves in a wave-dominated inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(8), 5418-5435.
- Bertin, X. *et al.* (2018). Infragravity waves: from driving mechanisms to impacts. *Earth Science Reviews*, 177, 774-799.
- De Bakker, A.T.M., Tissier, M.F.S., Ruessink, B.G. (2014). Shoreline dissipation of infragravity waves. *Continental Shelf Research*, 72, 73-82.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific. 443 pp.
- Guza, R.T. and Thornton, E.B. (1982). Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87 (C1), 483-491.
- Lo, J.M. and Dean, R.G. (1995). Long waves due to interactions beneath wave groups. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 121(6), 317-325.
- Longuet-Higgins, M.S. (1984). Statistical properties of wave groups in a random sea state. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. 312, 219-250.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13, 481-504.
- Ochi, M. (1998). *Ocean Waves: The Stochastic Approach*. Cambridge University Press. 332 pp.
- Okiihiro, M., Guza, R.T., Seymour, R.J. (1992). Bound infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 97(C7), 11453-11469.
- Pianosi, F., Sarrazin, F., Wagener, T. (2015). A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis. *Environmental Modelling & Software*, 70, 80-85.

## Bound and free infragravity waves over a bar

D. Mendes (1,2,3), A.A. Pires-Silva (1), J.P. Pinto (3) and A.B. Fortunato (2)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal. ddiogosm@gmail.com

(2) LNEC, Lisbon, Portugal.

(3) IH, Lisbon, Portugal.

**Abstract:** This study aims to investigate the changes in the infragravity wave energy under partial short-wave breaking conditions induced by a longshore bar. Field observations of near-bottom pressure records on a cross-shore array were analysed for such purpose. The bispectrum was employed to detect the phase-coupling between short and infragravity wave frequencies. This allowed to separate the infragravity wave energy in bound and free energy components.

The bar crest induced a decrease on the short-wave energy due to depth-induced breaking. At the same location, a damping on the bound infragravity wave energy was observed. This damping coincides with a negative value of the short-wave radiation stress cross-shore gradient. This provides evidence that bound infragravity wave energy decreases with a reduction in the forcing.

**Key words:** Infragravity waves, Bispectral analysis, Field observations, S. Jacinto

### 1. INTRODUCTION

Wind-generated surface gravity waves with periods between 4 s and 25 s often drive the morphological evolutions in coastal environments. Hereafter they will be denoted by short-waves (SW). The energy associated to SW is mainly dissipated by depth-induced breaking across the surf zone and near the shoreline. The swash zone is dominated by infragravity waves (IGW) with periods between 25 s and 250 s (Guza and Thornton, 1982).

Two mechanisms were proposed to generate IGW. Longuet-Higgins and Stewart (1962) proposed the so called bound wave mechanism (BWM) in which nonlinear interactions between SW frequencies can transfer energy to IGW frequencies. The result is a low-frequency fluctuation of the mean sea level that travels bounded to a SW group of high waves, commonly known as bound wave. Later, Symonds *et al.* (1982) suggested what will be known as the breakpoint mechanism (BKM), which is due to the time displacement of the breaking point location that generates a dynamic wave setup. An important difference between both mechanisms is the propagation speed of the resulting IGW. On one hand, the IGW associated to a bound wave would travel bounded to the SW group and therefore with the wave group velocity. On the other hand, the IGW generated by the BKM would travel with its free wave celerity.

The focus of this work will be on the bound wave. In particular, it aims to address what happens to the bound wave during SW breaking under intermediate water conditions using field observations.

Previous studies commonly assumed that the bound wave is released after SW breaking but they do not

suggest any release mechanism. Other view point is that bound IGW energy decays with the forcing, i.e. SW groups. Baldock and Huntley (2002) distinguished two different cases. The former is the situation where SW are shallow water waves at the breakpoint (i.e.  $kh < 0.314$ ,  $k$  is the wavenumber,  $h$  is the mean water depth and  $kh$  is the relative wavelength). In this case, a bound wave will propagate with the free wave celerity towards the shoreline. The latter, is the case where SW are not shallow water waves at the breakpoint (i.e.  $kh > 0.314$ ). If so, a bound wave would propagate shoreward with the SW group velocity. In this situation, Baldock (2012) argued that the bound IGW energy would decay with the forcing, i.e. the SW groups.

The main purpose of this study is to assess the changes in the bound IGW energy after SW breaking using field data collected over a longshore bar. A bispectral analysis was employed to estimate fraction of bound IGW energy.

### 2. METHODOLOGY

#### 2.1 Field data

A two-day field campaign took place in S. Jacinto beach in June, 2015. Eight pressure transducers (PT) were moored on a cross-shore transect almost perpendicular to the coastline and over a longshore bar that is a distinct feature of this beach. Along the two days period, the incident SW groups arrived from the west-northwest sector. The significant SW height ( $H_{sw}$ ) varied between 1 m and 1.5 m and the peak SW period ( $T_p$ ) decreased from 12 s to 9 s.

#### 2.2 Data analysis

Each time record of near-bottom pressures, with a sampling frequency of 2 Hz, was low-pass filtered

with a cut-off frequency of 0.004 Hz to remove the tidal oscillations. After, three blocks of approximately 136 min ( $2^{14}$  observations) were selected around either low- or high-tide. The wave spectrum was calculated with the Welch method accounting with a linear correction for pressure attenuation over depth. The number of degrees of freedom ( $dof$ ) was 62 with a frequency resolution ( $df$ ) of 0.002 Hz. The SW frequency band was defined between 0.04 Hz and 0.3 Hz and the IGW frequency band was defined between 0.004 Hz and 0.04 Hz. The mean water depth ( $d$ ) was defined as the mean of the tidal oscillation for each block. The peak SW wavenumber ( $k_p$ ) and the mean SW wavenumber ( $k_m$ ) were determined using the linear wave theory after knowing  $d$ ,  $T_p$  and  $T_m$ .

### 2.3 Bound wave energy

The bound IGW is generated due to second-order nonlinear interactions between SW (Longuet-Higgins and Stewart, 1962). These second-order nonlinear interactions cannot be detected using first-order spectral analysis. Therefore, a higher-order spectral analysis (i.e. bispectrum) was used. The bispectrum was computed for each block. A frequency averaging on eleven frequencies was additionally performed to improve the bispectral stability, yielding 154  $dof$  and a  $df$  of 0.0054 Hz.

Herbers *et al.* (1994) proposed an indirect measure to obtain the bound IGW energy. In this formulation, the bound IGW energy is equal to the product between the zeroth moment IGW energy and a double integration of the bispectrum [Herbers *et al.* (1994) for details]. Hereinafter, it is assumed that the total IGW energy is equal to the sum between bound IGW energy and free IGW energy. For the remaining of this study, the total IGW energy is denoted by  $E_t$ , the bound IGW energy is denoted by  $E_b$  and the free IGW energy is denoted by  $E_f$ .

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Cross-shore evolution of the significant wave height

Fig. 1 displays  $H_{sw}$ ,  $H_{ig}$  and  $d$  for each of the three blocks at each cross-shore position. The horizontal axis is the distance between each PT and the most offshore PT, thereby increasing to the coastline.  $H_{sw}$  decreases from 1.45 m to 1.2 m between  $60 < X < 140$  m (Fig. 1 – panel a, diamonds) for the first low-tide. This decrease can be explained by depth-induced breaking over the bar crest as in Roelvink and Stive (1989). Similar but milder decreases in  $H_{sw}$  are also observed for the other scenarios (high-tide and second low-tide).

The  $H_{ig}$  increases shoreward as expected because it is inversely proportional to the water depth until the inner surf zone. A small decrease is observed during the first low-tide (diamonds – Fig. 1b,  $X \sim 120$  m).

This decrease will be further investigated below after separating the IGW energy in bound and free IGW components.

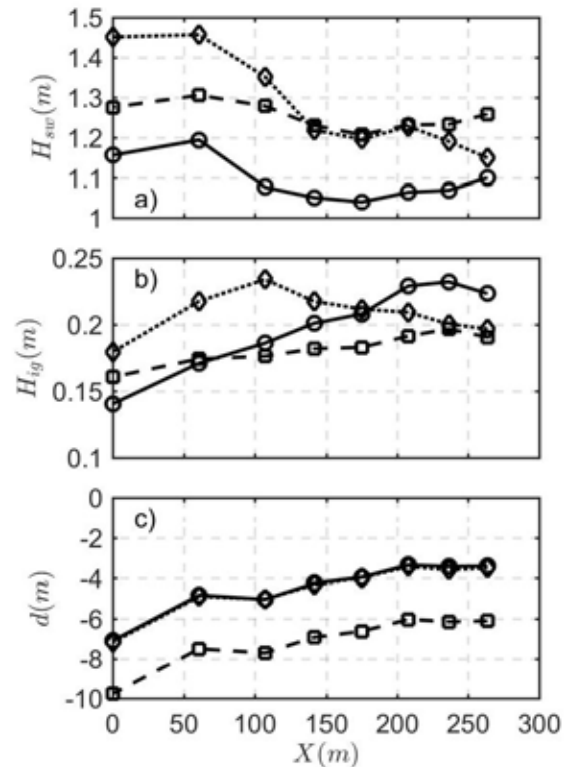


Fig. 1. Cross-shore evolution of the significant short (top) and infragravity (middle) wave height and total water depth (m). Symbols are representative of the first low-tide (diamonds), first high-tide (squares) and second low-tide (circles).

### 3.2 Cross-shore evolution of the bound wave energy

Fig. 2 displays the ratio between bound and total IGW ( $E_b/E_t$ ), the relative water depth ( $k_p h$ ) and  $d$ . During both low-tides, shallow water conditions ( $kh < 0.314$ ) are reached at  $X \sim 190$  m. Consequently, the decrease in  $E_b/E_t$  at  $X \sim 60$ - $110$  m is not due to the release of the bound IGW energy. If so, shallow water wave conditions ( $kh < 0.314$ ) would be satisfied for the SW energy. The bound IGW energy, previously propagating with the SW group velocity, would start to propagate with its free wave velocity in shallow waters, i.e. the bound IGW would be released as free IGW. This is not the case.



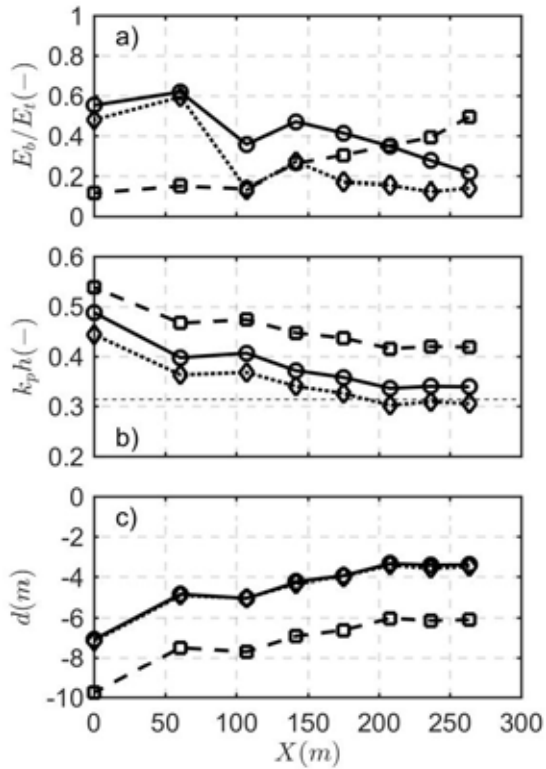


Fig. 2. Cross-shore evolution of the ratio between bound and total infragravity wave energy (top), relative water depth (middle) wave height and total water depth (m). Symbols are representative of the first low-tide (diamonds), first high-tide (squares) and second low-tide (circles).

In the following, we will assess the hypothesis that the decay on  $E_b/E_t$  at  $X \sim 60$ -110 m, associated to the bound IGW, is due to a reduction in the forcing, i.e. SW groups.

Fig. 3 shows  $E_b/E_t$ , the cross-shore gradient of the radiation stress ( $S_{xx}$ ) and  $d$ .  $S_{xx}$  was estimated with the linear wave theory and the cross-shore gradients were estimated using centred finite-differences. During the first low-tide (diamonds – Fig. 3b),  $dS_{xx}/dx$  displays negative values over the bar trough. These negative values imply a reduction in the forcing, i.e. the SW groups.

An interesting observation is the behaviour  $E_b/E_t$  for  $X > 110$  m during both low-tides (Fig. 3a). A small increase on  $E_b/E_t$  occurs between  $X = 110$  m and  $X = 140$  m followed by a decrease shoreward.

Looking now to Fig. 2b,  $k_p h$  is close to the shallow water limit (0.314), i.e. the SW group velocity is asymptotically close to the free wave velocity in shallow waters. We therefore attribute the decrease on  $E_b/E_t$  as a result of the bound IGW transformation. The bound IGW starts to propagate with the free wave velocity, becoming a free wave. Following (Baldock, 2012), interactions between free waves are weak. Consequently, the  $E_b/E_t$  would decrease shoreward.

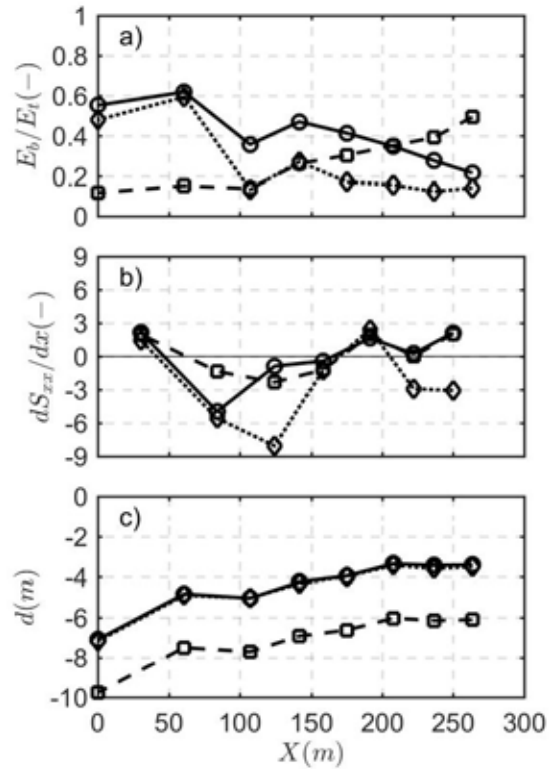


Fig. 3. Cross-shore evolution of the ratio between bound and total infragravity wave energy (top), radiation stress gradient (middle) and total water depth (m). Symbols are representative of the first low-tide (diamonds), first high-tide (squares) and second low-tide (circles).

It is important to note that other sources of free IGW energy are possible. As an example, a SW group propagating over a bar under breaking conditions will generate a time-varying wave setup with a time scale similar to the SW group (BKM generation mechanism, see Section 1). This can explain why  $H_{ig}$  increases shoreward despite the damping in the bound IGW energy (compare Fig. 1 and 2).

In summary, our results indicate two different types of damping in the bound IGW energy. The former is associated to a decay in the SW forcing. The latter is attributed to the release of the bound IGW energy as free IGW energy in shallow water conditions.

The decay of the bound IGW energy associated to a decay on the radiation stress gradient supports the studies of (Baldock, 2012; Baldock and Huntley, 2002). A forced IGW would reduce in energy due to the decay in the forcing if depth-induced breaking occurs before shallow water conditions, i.e.  $kh < 0.314$ .

#### 4. CONCLUSION

Field observations of near-bottom pressure records collected over a longshore bar were analysed to understand the cross-shore propagation of the bound IGW energy. The results corroborate the hypothesis

of Baldock (2012) that if SW breaking occurs before shallow water conditions ( $kh > 0.314$ ), the bound IGW energy would decay with the forcing, i.e. SW groups.

### Acknowledgements

The authors would like to acknowledge all the participants in the field campaign. Field observations were collected with funding from project RAIA.CO (0520\_RAIA\_CO\_1\_E), Observatório Marinho da Margem Ibérica e Litoral, funded by the European Fund for Regional Development (EFDR) through the Programa Operacional de Cooperação Transfronteiriça Espanha-Portugal (POCTEC). The first author acknowledges a PhD fellowship granted by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (grant PD/BD/114463/2016).

### REFERENCES

- Baldock, T.E. (2012). Dissipation of incident forced long waves in the surf zone – implications for the concept of “bound” wave release at short wave breaking. *Coastal Engineering*, 60(1), 276-285.
- Baldock, T.E. and Huntley, D.A. (2002). Long-wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach. *Proceedings of the Royal Society A*, 458, 2177-2201.
- Guza, R.T. and Thornton, E.B. (1982). Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87 (C1), 483-491.
- Herbers, T.H.C., Elgar, S., Guza, R.T. (1994). Infragravity-frequency (0.005-0.05 Hz) motions on the shelf. Part I: forced waves. *Journal of Physical Oceanography*, 24(5), 917-927.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’. *Journal of Fluid Mechanics*, 13, 481-504.
- Roelvink, J.A. and Stive, M.J.F. (1989). Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94 (C4), 4785-4800.
- Symonds, G., Huntley, D.A., Bowen, A.J. (1982). Two-dimensional surf beat: long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87 (C1), 492-498.

# Field observations of nonlinear wave parameters on a rocky platform

J. Machado (1), D. Mendes (1) and A.A. Pires-Silva (1)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal. joaotmachado89@gmail.com

**Abstract:** A two-day field campaign was performed on the Ribeira d'Ilhas rocky shore platform to collect near-bottom pressure records. The study site is located along the Portuguese western coast, approximately 40 km north of Lisbon. Field measurements conducted aim to characterize the wave nonlinearity by analysing the significant wave height to water depth ratio ( $\gamma$ ) (breaking and non-breaking sea states), the wave skewness and the wave asymmetry.

Higher and lower bound  $\gamma$  values of respectively 1.00 and 0.40 were observed. The  $\gamma$  value increased for a steeper bottom slope. The average values of wave skewness ( $\sim 0.75$ ) and wave asymmetry ( $\sim -0.8$ ) were of typical surf zone conditions. The increase on the offshore energy conditions had an influence on both average values of wave skewness ( $\sim 0.5$ ) and wave asymmetry ( $\sim -1$ ). A steeper bottom slope seems to reduce both wave skewness and asymmetry.

**Keywords:** Field observations, Rocky shore platform, Relative wave height, Wave skewness and asymmetry

## 1. INTRODUCTION

The hydrodynamic behaviour of wind-generated waves has been extensively addressed on sandy beaches but not so much on rocky platforms. These gently-sloping to near-horizontal rocky surfaces develop seawards and are frequently centred around the mean sea level (MSL).

*Sunamura (1992)* proposed two generalized rocky shore platform classification types. These types are not distinguished by their bottom slope, but by the existence of a sharp seaward plunging boundary. Type A platforms, usually gently sloping, are characterized by a continuous slope into the nearshore. Type B platforms, frequently near-horizontal, are recognized by having a sharp seaward edge that plunges into the nearshore. In the past few years field studies have been conducted to assess the wave transformation characteristics across rocky platforms (e.g., *Poate et al., 2017*).

Depth induced breaking (or surf breaking) is known to be the most nonlinear and highly dissipative process affecting waves in coastal waters. Entering shallow waters, the wave amplitude ( $a$ ) increases and, with it, so does the wave steepness  $\delta$  ( $\delta=a/L$ ,  $L$  is the wavelength). Moreover, the crest particles velocity overcomes the precedent trough velocity, triggering the breaking phenomena (e.g., *Banner and Phillips, 1974*). In this process, nonlinearities in the wave shape develop and linear wave theory no longer holds.

In the surf zone, the significant wave height ( $H_s$ ) can be approximated by a linearly dependency on water depth ( $h$ ). Moreover, establishing a simplified  $H_s/h$  relationship can be extremely useful since it can help to quantify and

parameterize wave energy dissipation in the nearshore.

The quantification of horizontal and vertical wave shape transformation, respectively wave skewness ( $Sk$ ) and wave asymmetry ( $As$ ), may be helpful to further understand wave attenuation controls in the nearshore.

Offshore deep water linear sinusoidal waves would have zero values of  $Sk$  and  $As$ . As these waves start to change their shape due to shoreward propagation, the  $Sk$  value reaches its maximum at the breaking point and decreases towards the shoreline. The  $As$  value steadily decreases (i.e. negative value) shoreward (e.g., *Elgar and Guza, 1985*).

This study aims to analyse nonlinear wave parameters across a Type B shore platform and assess their significance in wave attenuation into the nearshore. Namely, breaking and non-breaking relative wave height  $\gamma$  (i.e., the significant wave height to water depth ratio) will be under investigation. Furthermore, nonlinear wave shape transformation as measures of wave horizontal asymmetry (i.e.,  $Sk$ ) and vertical asymmetry (i.e.,  $As$ ) will be discussed. Field observations of near-bottom pressure records collected at the intertidal zone of Ribeira d'Ilhas will be analysed for such purpose.

## 2. FIELD DATA AND METHODS

### 2.1 Ribeira d'Ilhas campaign

The study site is located along the western Portuguese coastline. Ribeira d'Ilhas is a fully exposed high energy intertidal shore platform (corresponding to Type B of *Sunamura (1992)*) and waves approach predominately from the

west-northwest sector. The field campaign was conducted over a two-day period from March 28<sup>th</sup> to 29<sup>th</sup>, 2017. Offshore wave buoy (moored at a 500 m depth location) measurements are shown in Figure 1.

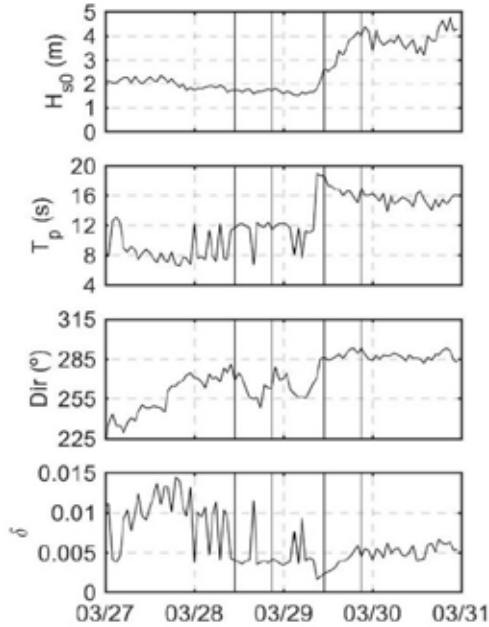


Fig. 1. Offshore wave buoy measurements of significant wave height, peak wave period, mean wave direction and offshore wave steepness from top to bottom, respectively.

A shore-normal array of 5 pressure transducers (PTs) was installed upon the platform surface approximately 5 cm above the bed at the intertidal zone. These PTs collected near-bottom pressure records with a sampling frequency of 2 Hz. Of note, the landward-most PT (PT5, as PTs were numbered from the outer to the inner-most location) was lost during the second day of recordings due to the more energetic wave conditions.

## 2.2 Field data pre-processing

A total of 9 different time series were recorded over the duration of the experiment. Each time series had a total length of approximately 11 hours and was low-pass filtered with a cut-off frequency of 0.001 Hz to remove the tidal oscillations. Next, each time series was divided in 30-minute blocks. The mean value of the tidal oscillations for each block was defined as  $h$ . The high-frequency oscillations associated to wind-generated wave motions ( $\eta$ ) were obtained by subtracting the tidal oscillations from the original signal.

The wave spectrum ( $S$ ) was computed for each block using the Welch method with 26 degrees of freedom and 0.0039 Hz frequency resolution. A frequency-dependent correction factor was applied based on linear wave theory to take into

account the pressure attenuation over the water depth with a maximum correction factor of 4.  $H_s$  was obtained through integration of the zeroth spectral moment:

$$H_s = 4 \sqrt{\int_{0.04}^{0.33} S(f) df} = 4\sqrt{m_{0sw}} \quad (1)$$

Once both  $h$  and  $H_s$  were computed for each PT, and for each block,  $\gamma$  was assessed in every PT position. All blocks that had  $h < 0.5$  m were excluded from further analysis to remove PTs experiencing wet and dry conditions.

## 2.3 Determination of wave skewness and wave asymmetry

Values of  $Sk$  and  $As$  were obtained for each block in every PT location, following Kennedy *et al.* (2000) approach:

$$Sk = \frac{\overline{\eta^3}}{(\overline{\eta^2})^{3/2}} \quad (2)$$

$$As = \frac{\overline{H(\eta^3)}}{(\overline{\eta^2})^{3/2}} \quad (3)$$

$H$  in equation (3) represents the Hilbert transform operator and the overbar in (2) and (3) denotes the expected value.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Relationship between significant wave height and water depth

Upper bound  $\gamma$  limits are particularly useful to assess maximum wave conditions that can occur for a given  $h$ . Concerning the present study, upper bound  $\gamma$  values can be inferred from Figure 2a and 2b (represented by straight lines in both figures) correspondent to day 1 and 2 of the field campaign, respectively. Experiments and studies conducted on sandy beach settings suggested  $\gamma$  to be constant inside the surf zone with an upper bound value of 0.59 (e.g., Thornton and Guza, 1982). Moreover, subsequent research works found  $\gamma$  to vary with the offshore wave steepness (e.g., Nairn *et al.*, 1990) and with the beach slope (e.g., Sallenger and Holman, 1985).

As drawn in Figure 2a, an upper bound  $\gamma$  value of 0.40 was observed for the first day data recordings (i.e., black straight line). The landward-most PT (PT5) displayed a higher bound  $\gamma$  value of 1.00 (i.e., red straight line). This difference is explained by a large increase in the bottom slope towards the cliff-foot. Therefore, the bottom slope contributes to differences in  $\gamma$  values in our study site.

Conversely, in the second day (Fig. 2b), an upper bound  $\gamma$  value of 0.51 was observed. This slightly higher  $\gamma$  limit is related to the offshore significant wave height increase (Figure 1). This increase moves the breakpoint location further offshore and the instruments are located further inside the surf zone. Note that the offshore wave steepness was approximately similar during the time interval of observations (Fig. 1).

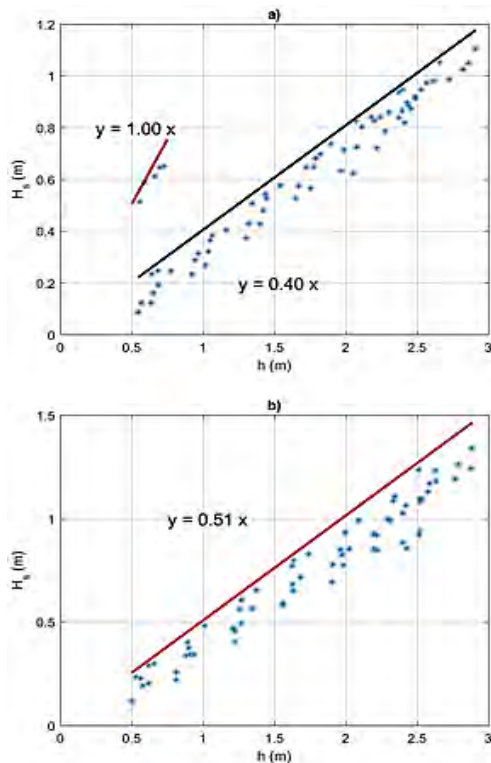


Fig. 2. Significant wave height  $H_s$  versus water depth  $h$  computed in all PTs. Upper bound  $\gamma$  values correspond to the straight lines. a) First day of the field campaign. Red straight line corresponds to the upper bound  $\gamma$  value for the landward-most PT (PT5); Black straight line corresponds to the upper bound  $\gamma$  value associated to the other PTs (PT1 to PT4). b) Second day of the field campaign (PT1 to PT4).

Surf zone saturation is observed if  $H_s$  shows a linear relationship with  $h$  (Thornton and Guza, 1982). In addition, Thornton and Guza (1982) associated this  $H_s$  depth dependence with a high proportion of the waves breaking, being this quasi-linear relationship between  $H_s$  and  $h$  that separates the inner surf zone from the outer surf zone. These authors pointed out that the large variability in  $H_s$  decreased inside the surf zone. However, a decrease in the variability of  $H_s$  was not observed in our study. In fact, the absence of a reduction in  $H_s$  variability with water depth suggests that all PTs were inside the breaking zone in our study site.

### 3.2 Wave skewness and asymmetry in the surf zone

Both measures of nonlinear wave shape, namely  $Sk$  and  $As$ , were computed for both days of the

field campaign and in each PT position. Results are plotted against  $h$  in Figs. 3 and 4.

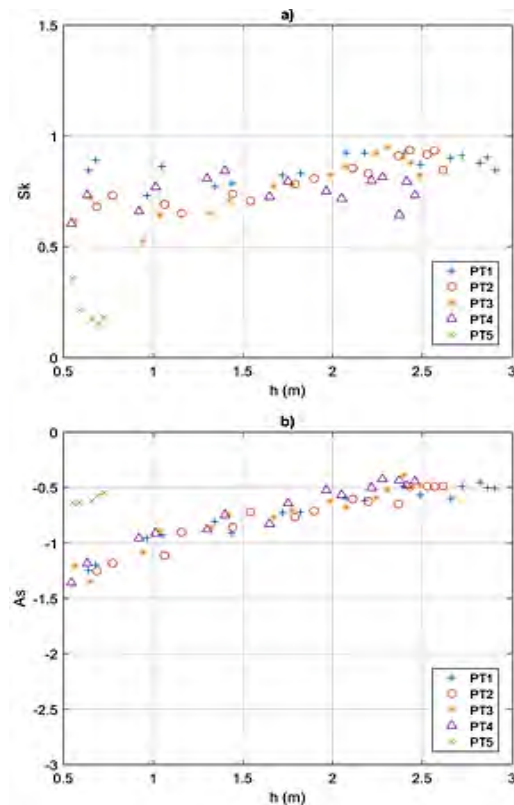


Fig. 3. First day of the field campaign. a) Wave skewness plotted against the water depth in each PT position. b) Wave asymmetry plotted against the water depth in each PT position.

As shown in both Figs. 3 and 4, the wave shape is not associated to linear sinusoidal waves because both values of  $Sk$  and  $As$  were different than zero.

Of interest, the landward-most PT5 (Fig. 3) showed a considerable decrease of both  $Sk$  and  $As$  when compared to the other PTs for the same  $h$ . This may be explained by the effect of the bottom slope in this specific cross-shore location.

Furthermore, it can be seen that for the same  $h$  differences within both days of the field campaign in terms of  $As$  and  $Sk$  were identified.

As an example,  $Sk$  values were approximately 0.75 for  $1.5 \text{ m} < h < 2.0 \text{ m}$  in the first day (Figure 3a). For the same  $h$ , these values dropped to 0.5 in the second day (Figure 4a). Since  $Sk$  values display their maximum near the breaking point and decrease further shoreward, this can be explained by the more energetic offshore wave conditions experienced during the second day (first panel of Figure 1). The breakpoint location likely moved seaward and PTs were located further inside the surf zone during the second day. Similar changes can be seen for  $As$  with an increase during the second day.

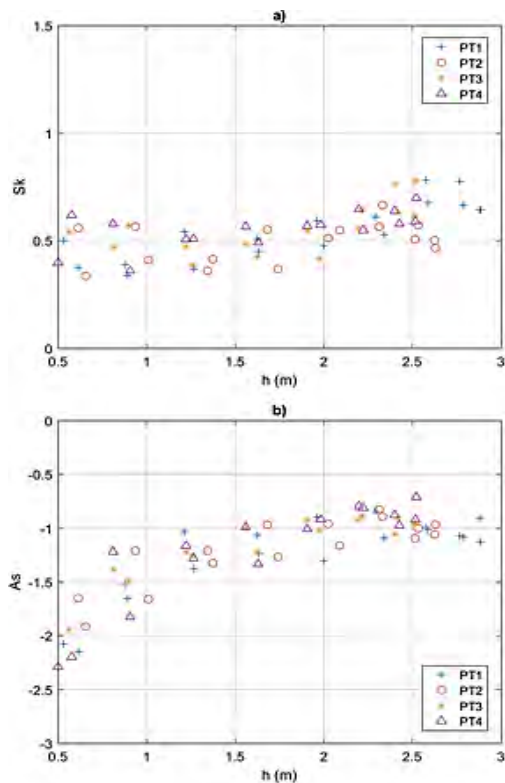


Fig. 4. Second day of the field campaign. a) Wave skewness plotted against the water depth in each PT position. b) Wave asymmetry plotted against the water depth in each PT position.

Both  $Sk$  and  $As$  differences are congruent and can be explained by the more energetic conditions registered in the second day. The breaking location probably occurred in a seaward position (when compared to the first day), thereby widening the breaking zone.

Furthermore, both  $Sk$  and  $As$  values are similar to those identified in other conducted studies (e.g., Kennedy *et al.*, 2000). These values denote highly nonlinear shoaling and breaking waves, meaning continuous and turbulent wave energy dissipation due to depth induced breaking towards the shore.

#### 4. CONCLUSIONS

In the first day of data recordings,  $\gamma$  displayed an upper bound value of 0.40, increasing to 1.00 at the landward-most position, highlighting the bottom gradient control on wave energy dissipation in the nearshore. Conversely, in the second day of the field campaign, the upper bound  $\gamma$  limit showed a slight increase to 0.51.

The comparison of the values of  $Sk$  and  $As$  indicate that the PTs were located further inside the surf zone during the second day (i.e.  $Sk$  value decrease and  $As$  value was more negative) due to the more energetic wave conditions experienced. Furthermore, an apparent control of the bottom slope on  $Sk$  and  $As$  was identified in this analysis.

#### Acknowledgements

Umberto Andriolo and the whole team of the Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa are acknowledged for making available the field measurements, which they have carried out.

#### REFERENCES

- Banner, M. and Phillips, O. (1974). On the incipient breaking of small-scale waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 4, 646-656.
- Elgar, S. and Guza, R. (1985). Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 161, 425-448.
- Kennedy, A., Chen, Q., Kirby, J. & Dalrymple, R. (2000). Boussinesq modelling of wave transformation, breaking and runup. *Journal of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering*, 126(1), 39-47.
- Nairn, R., Roelvink, J. & Southgate, H. (1990). Transition zone width and implications for modelling surfzone hydrodynamics. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(22).
- Poate, T., Masselink, G., Austin, M., Dickson, M. & McCall, R. (2017). The role of bed roughness in wave transformation across sloping rock shore platforms. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 1-27.
- Sallenger, A. and Holman, R. (1985). Wave energy saturation on a natural beach of variable slope. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6).
- Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley and Sons. 302 pp.
- Thorton, E. and Guza, R. (1982). Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 87(C12), 9499-9508.

## Water quality, morpho-sedimentary and hydrodynamical short term evolution of the Douro River estuary

I. Iglesias (1), A. Bio (1)\*, H. Granja (1), A. P. Mucha (1), A. L. Costa (1) and L. Bastos (1, 2)

(1) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR/CIMAR), University of Porto, Edifício do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos, S/N, 4450-208 Matosinhos, Portugal. E- mail: [anabio@ciimar.up.pt](mailto:anabio@ciimar.up.pt)

(2) Department of Geosciences, Environment and Spatial Planning, Faculty of Sciences, University of Porto, Rua Campo Alegre 687, 4169 - 007 Porto, Portugal.

**Abstract:** The characterization of the estuarine environment variability requires frequent in-situ measurements to ascertain the dynamics of key physical, chemical, geological and biological descriptors. Within the scope of the ECOSERVICES project, the water quality, morpho-sedimentary and hydrodynamical behaviour and evolution of the Douro estuary were characterized based on the results obtained from several in-situ campaigns. A complete database of the Douro estuarine area, including sediments in suspension and bedload, fecal indicator bacteria, currents and vertical profiles of salinity, temperature, pH, oxygen and turbidity was built, incorporating also data from previous projects such as ECOIS, RAIA, ECORISK as well as from the FCT funded COD-CIIMAR activities. This database was generated to map the main morpho-sedimentar and hydrodynamical processes that take place in this region, to show the present state of the Douro River estuary and to depict the complex map of the estuarine trends in the present context of climate change and anthropic actions.

**Key words:** Morpho-sedimentary processes, hydrodynamics, water quality, estuarine evolution, in-situ campaigns, Douro estuary.

### 1. INTRODUCTION

Estuarine areas are complex interfaces between rivers and coast considering the physical, morphological, chemical and biological processes taking place there. In the present context of climate change and more frequent extreme events, these highly populated regions present vulnerabilities, e.g. related with human settlement or leisure and industrial activities, which should be identified to avoid serious damage with negative effects on littoral populations.

Also, the increase of anthropogenic activities in estuarine areas requires an adequate understanding of these actions and their impact on the environment, identifying vulnerable areas and assessing the effects of harmful actions on their prolific flora and fauna and ecosystem services (fisheries, tourism, water catchment, etc.).

To support an effective and integrated management of these areas, providing information to promote the security of the populations and the sustainability of the marine ecosystems and services, a comprehensive morphosedimentar, physicochemical and biological characterization must be performed. Proper management must be based on a sound characterization of these areas, commonly made through in-situ measurements. These measurements, if performed with certain periodicity, can be used to depict the complex map of the estuarine trends and man-made interventions impacts through the

analysis of key physical, chemical, geological and biological descriptors, such as river flows, currents, temperature, salinity, pH, fecal indicator bacteria, oxygen, turbidity, bathymetry and sediments characteristics.

### 2. GEOGRAPHICAL DESCRIPTION

This study focusses on the Douro estuary (Fig. 1), for which an extended dataset was compiled using data acquired in the scope of national (ECOIS, NICC, ECORISK, ECOSERVICES), and international (RAIA, RAIA.co, RAIA tec; Bastos *et al.*, 2011 and 2016) scientific projects, as well as within COD-CIIMAR FCT funded regular activities (PesTC/Mar/LA0015/2011 and LA0015/2013).



Fig. 1. Douro river estuary. Main structures and sampling points. Black squares: Drifters. Black dots: vertical profiles and water and bedload samples. (Maps source: Google Earth).

The Douro river reaches the Atlantic Ocean through a mesotidal narrow estuary surrounded by two major

cities: Porto and Vila Nova de Gaia. Its dynamics is mainly forced by freshwater flows that depend on the natural climate variability and on the hydropower production schedule at the Crestuma-Lever dam, which has strong impacts on the estuarine hydrodynamics and the associated sediment transport patterns (Azevedo *et al.*, 2010; Iglesias *et al.*, 2014; Iglesias *et al.*, 2018).

This estuary, which presents strong currents and recurrent severe floods, is protected by a dynamic sand spit that partially obstructs the ocean water entry (Fig. 1, Portela, 2008; Bastos *et al.*, 2012). To prevent erosion of this formerly very dynamic sand spit and improve navigability and riverbank protection, two breakwaters were built between 2005 and 2008. As expected, these interfered with local sedimentary and hydrodynamic patterns, reducing the depth of the São Paio Bay nature reserve, and extending the water residence time in this area. Furthermore, the area and volume of the sand spit increased, making the spit difficult to breach during river floods, which could result in harsher flood effects in terms of economic losses and structural damage (Bastos *et al.*, 2012; Iglesias *et al.*, 2018).

### 3. IN-SITU DATA ACQUIRED

Vertical profiles of currents velocity, temperature, salinity, turbidity, fluorescence, pH, total dissolved solids and oxygen were measured using current meters, CTD and multiparameter sondes at several estuarine locations. At the same points, bottom sediments (bedload) were collected with a dredge, for size analysis, and water from three depths (surface, medium depth and near the bottom) collected with a Niskin water sampler, for measurements of suspended sediments concentration and fecal indicators estimation. Furthermore, surface currents directions and velocities were obtained with dedicated lagrangian drifters campaigns and tide-gauge data were used to obtain tide related water elevation. Campaigns and measured data are described in Tables I and II, whereas the sampling points are shown in Fig. 1.

For the sediment analyses, the water samples were filtered with a vacuum pump and sediments in suspension retained in pre-weighted filters of cellulose nitrate (diameter: 47mm, porosity: 0.45 micra). The amount of sediments in suspension was analyzed by RX diffraction to identify the main minerals of clay size present in the sample. Sediments from the bottom were dry at 30 °C and sieved at 0.5 phi intervals for size analysis.

Samples for fecal indicator bacteria assessment were filtered onto sterile membrane filters placed on mFC agar plates (Difco 0677-17) for Enterobacteria (coliforms) (following a 24 h incubation at 44 °C) and on Slanetz & Bartley agar plates (Oxid CM0377) for Enterococci (following a 48 h incubation at 37 °C). Results were obtained by

counting the respective plates and expressed in terms of CFU/100 mL. CFU (Colony-forming units) is the number of microorganisms that can form colonies, an indication of the number of viable microorganisms in a sample (Gouveia *et al.* 2018).

Additional data (tides and river flow) was provided by the Portuguese Hydrographic Institute (<http://www.hidrografico.pt/>) and by *Energias de Portugal* (EDP).

Table I. ECOIS project campaigns. T: Temperature, S: Salinity, turb: Turbidity.

Data	Measurements
09/2005	Currents, T, S, turb and oxygen vertical profiles
02/2006	Currents, T, S, turb and oxygen vertical profiles
01/2007	Currents, T, S and turb vertical profiles
2005-2007	Tide associated water levels

Table II. RAI, ECORISK and ECOSERVICES projects campaigns. HT: High Tide, LT: Low Tide, T: Temperature, S: Salinity, turb: Turbidity, fluor: Fluorescence, TDS: Total Dissolved Solids.

Data	Daily mean caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tide	Measurements
11/12/2013 09:30h - 14:00h	150.44	HT:9:45h LT: 16:35h	Surface currents
15/04/2014 15:00h - 18:15h	1345.45	HT: 10:30h LT: 16:20h	Surface currents
14/07/2014 10:30h - 17:30h	164.03	LT: 11:35h HT: 17:30h	T and S vertical profiles; Suspended and bedload sediments
07/04/2015 10:30h - 16:30h	363.92	LT: 12:05h HT: 17:45h	T, S, turb and fluor vertical profiles; Suspended and bedload sediments; Fecal indicators
16/12/2016 12:30h - 16:00h	367.10	LT: 10:22h HT: 16:30h	T, S, oxygen, pH, TDS and turb vertical profiles; Suspended and bedload sediments
19/10/2017 9:30h - 14:00h	21.29	LT: 9:30h HT: 15:30h	T, S, oxygen, pH, TDS and turb vertical profiles; Suspended and bedload sediments

### 4. RESULTS

Analysis of the available data (Tables I and II) allowed classification of different estuarine patterns directly depending on the river flow. A salt wedge was identified for Douro river flows below 700 m<sup>3</sup>/s, showing a strong stratification of the water column and minimum salinity values at the surface (Figs. 2a and c). This stratification is maintained if low river flow and weak currents associated with flood tide are presented (ECOIS final Report, 2008). The salt wedge can reach Crestuma-Lever dam with river flows close to zero (Fig. 2c). During these low river flow conditions, the sea water masses reached the upstream limit of the estuary 2:30h after the tide began to rise. Ocean water masses were found in



areas with sharp bathymetry (Fig. 2a; ECOIS final Report, 2008). However, these water masses disappear with river flows above  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ , when the ocean water becomes restricted to the estuarine mouth region or gets even flushed out from the estuary (Fig. 2b). This situation of vertically homogenous water column is more frequent during spring (Santos *et al.*, 2006).

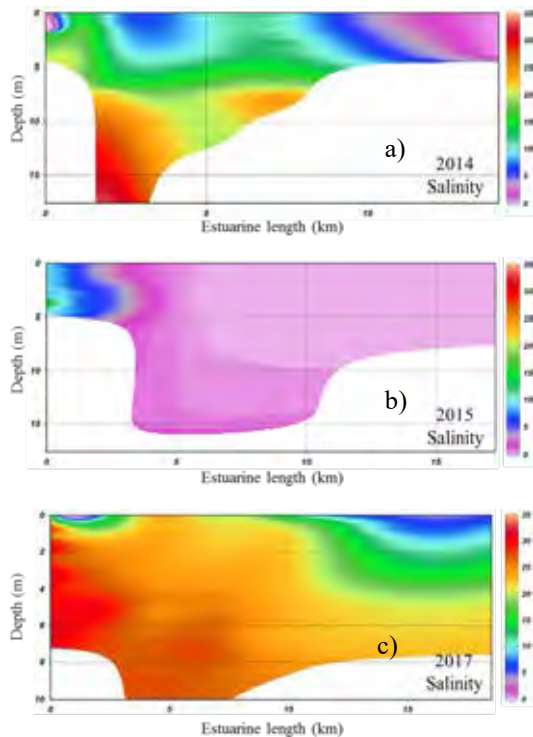


Fig. 2. Salinity vertical profiles for an estuarine section during the a) 2014, b) 2015 and c) 2017 campaigns.

The surface currents measured during 2013 and 2014 campaigns with the drifters depicted a mean downstream current of  $3.36 \text{ m/s}$ , related with the strong river flow and the ebb tide (15/04/2014), meanwhile a slow recirculation current ( $\sim 0.4 \text{ m/s}$ ), and a current parallel to the main current, but with opposite direction ( $\sim 0.3 \text{ m/s}$ ), was present at the São Paio bay (11/12/2013).

The fecal indicators were above the maximum recommended value during 2015 in the lower part of the estuary, which corresponds to the more urbanized estuary region. High values of Enterococci and Enterobacteria were observed all over the water column, even with high river flows (Table III).

Suspended sediments presented a rather uniform mineral composition dominated with quartz, muscovite and kaolinite detected in all samples. Illite, chlorite, gypsum and halite were also present in some samples, at least in traces. The concentration of the sediments is inversely proportional to the river flow: lower concentrations were found during stronger river flows and higher concentrations were associated with the salt wedge

initiation. This pattern was also depicted when the TDS were measured.

Bedload sediments were very coarse (very coarse sand and very fine pebbles) and mainly poorly sorted, with coarsest sediments upstream. The maximum size was found at Crestuma where very coarse, sub to rounded shape pebbles, were collected.

Table III. CFU/100ml of Enterococci and Enterobacteria for each sampled point. Values above maximum recommended CFU's are marked in red. S: Surface, M: Medium and B: Bottom depths.

Sample	Fecal indicator bacteria					
	Enterococci			Enterobacteria		
	S	M	B	S	M	B
1 (estuary mouth)	-	120	-	-	<100	-
2	1650	-	280	500	-	700
3	410	-	190	600	-	700
4	310	310	330	<100	600	100
5	310	400	260	1200	800	800
6	340	320	160	500	700	<100
7	<10	<10	30	100	<100	200
8	10	<10	10	<100	<100	<100
9	<10	<10	<10	<100	<100	<100
10 (estuary head)	<10	<10	<10	<100	<100	<100

Finally, the Douro river discharge trends were calculated using the daily mean values at Crestuma-Lever dam for a 32-year period (1986-2017). The obtained monthly trends vary from positive (February, March, April, May, August and September) to negative (January, June, July, October November and December), with an unclear pattern. However, when the number of days above the 90<sup>th</sup> or below the 10<sup>th</sup> percentile are considered (Fig. 3), a clear trend can be observed, with an increase in the number of days with high river flow and a decrease in the number of days with low river flow.

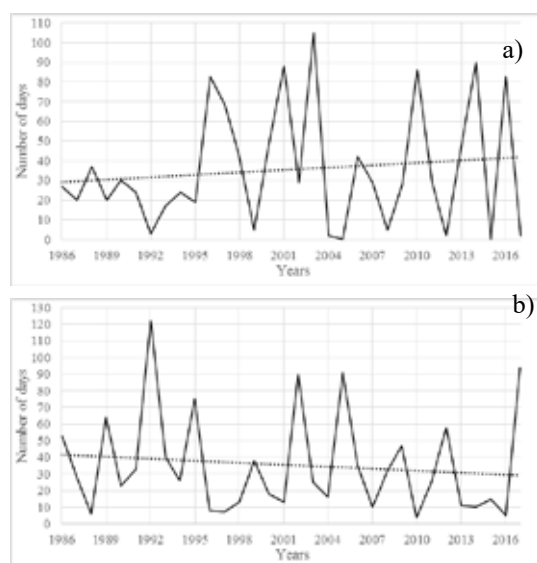


Fig. 3. Number of days with daily mean river discharge a) above the 90<sup>th</sup> percentile ( $= 1057.26 \text{ m}^3/\text{s}$ ) and b) below the 10<sup>th</sup> percentile ( $= 58.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## 5. CONCLUSIONS

The results obtained after analyzing the available data (Table I and II) revealed a classic stratified pattern of a salt-wedge estuarine configuration during low Douro river flows, whereas, high river flows push sea and estuarine waters towards coastal locations. The represented patterns depict the configuration of mesotidal estuaries with a dominant semi-diurnal tide component (Santos *et al.*, 2006, ECOIS final Report, 2008). Stronger surface currents were observed inside the main channel whereas, weaker currents occurred near the inlet sand spit, producing higher water residence times to the east (upriver) of the spit. This situation can generate stagnant waters, favoring the silting-up of the area and trapping sediments, pollutants, larvae and water masses inside the estuarine region.

Values above the maximum recommended for fecal indicator bacteria were observed in the lower part of the estuary over the whole water column, which means that contamination by sewage discharges can disperse reaching coastal locations outside the estuary.

The suspended sediments generally present low concentrations and rather uniform mineral composition, and the bedload poorly sorted samples exhibit a coarser trend upstream.

The river flow trends revealed an increase in the mean discharge through an increase/decrease of the number of days above/below the considered percentiles. These trends reflect a change in the river flow patterns, associated with natural climate variability and/or the hydropower production schedule, and could affect the main estuarine hydrodynamics with effects on the local ecosystems.

The generated database allowed to map the main morpho-sedimentar and hydrodynamical processes that take place in this estuarine area. Results also represent the present state of the Douro River estuary, which allows analysis of its evolution in the present context of climate change and man-made interventions. Additional campaigns will take place in the near future to complement this database and create a reliable information tool that allows to identify estuarine vulnerabilities and support adoption of measures that guarantee the sustainability of estuarine ecosystems and services and, therefore the security of the populations.

### Acknowledgements

This research was partially supported by the Strategic Funding UID/Multi/04423/2013 through national funds provided by FCT – Foundation for Science and Technology and European Regional Development Fund (ERDF) and by the Research Line ECOSERVICES, integrated in the Structured Program of R&D&I INNOVMAR: Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation

of Marine Resources (NORTE-01-0145-FEDER-000035), funded by the Northern Regional Operational Programme (NORTE2020) through ERDF.

## REFERENCES

- Azevedo, I.C., Bordalo, A.A. and Duarte, P.M. (2010). Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal). *Water Research*, 44, 3133–3146.
- Bastos, L., Bio, A. and Iglesias, I. (2016). The Importance of Marine Observatories and of RAIA in Particular. *Frontiers in Marine Science*, 3(140), 1-11.
- Bastos, L., Bio, A., Pinho, J.L.S., Granja, H. and da Silva A. Jorge (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53–69.
- Bastos, L., Bos, M., Caldeira, R., Couvelard, X., Allis, S., Bio, A., Araujo, I., Fernandes, J. and Lazaro, C. (2011). Monitoring and Forecasting Ocean Dynamics at a Regional Scale. *Spatial and organization dynamics. Discussion papers*, 8, 99-106.
- Gouveia, V., Almeida, C. M. R., Almeida, T., Teixeira, C., & Mucha, A. P. (2018). Indigenous microbial communities along the NW Portuguese Coast: Potential for hydrocarbons degradation and relation with sediment contamination. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 620-632.
- Iglesias I., Couvelard X., Avilez-Valente P. and Caldeira R.M.A. (2014). NW Iberia shelf dynamics: The river Douro plume. *Book of Proceedings 3rd IAHR Europe Congress*, Porto, 1-10.
- Iglesias, I., Pinho, J.L., Venâncio, S., Aviles-Valente, P., Peixoto, R. and Vieira, J.M. (2018). Simulação de níveis de cheia no estuário do rio Douro, antes e após a construção dos molhes. *Revista Recursos Hídricos*, 39(1), 21-30.
- Portela, L.I. (2008). Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters*, 28, 77–86.
- ECOIS final Report (2008). Relatório final do projeto ECOIS (POCTI/CTA/48461/2002). pp 85.
- Santos, A. I., Balsinha, M.J., Oliveira, A. and Jorge da Silva, A. (2006). Tide induced variability in the hydrography and dynamics of the Minho and Douro estuaries during low runoff. *Book of abstracts of the 5<sup>th</sup> symposium on the Iberian Atlantic margin*.

## Western Iberia sea surface salinity patterns due to land inputs

F. Campuzano (1), M. Juliano (2), M. M. Angélico (3), P. Oliveira (3) and R. Neves (1)

- (1) MARETEC- Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa. Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. [campuzanofj.maretec@tecnico.ulisboa.pt](mailto:campuzanofj.maretec@tecnico.ulisboa.pt).
- (2) Universidade dos Açores, Lda. Edifícios da Marina, Apartado 64, 9760-412 Praia da Vitoria, Ilha da Terceira, Açores, Portugal.
- (3) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA). Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 1495-165 Lisboa, Portugal.

**Abstract:** An original methodology integrating the water cycle from rain water to the open ocean by numerical models was set up using an offline technique. The different components of the system, including watersheds, estuaries and regional ocean, for Western Iberia were reproduced using numerical models of the MOHID Water Modelling System (<http://www.mohid.com>). 44 estuarine and river fluxes were implemented as land-ocean boundary conditions in a regional ocean model. The performance of the methodology was evaluated aided by *in situ* cruises and observations. The modelling results served to study seasonal and interannual evolution of the sea surface salinity patterns, including the Western Iberia Buoyant Plume (WIBP), and to describe a new feature named as the Western Iberia Central Plume (WICP) resulting from the Tagus-Sado estuaries contribution. Modelling results were used, in combination with observed data, to analyse an extreme runoff event during April 2013.

**Key words:** Western Iberia, salinity, PCOMS, MOHID, Estuary, Watershed

### 1. INTRODUCTION

In western Iberia, the relatively recent detection and description of a significant regional feature associated to fresh water inputs increased the attention to this subject from the oceanographic point of view. The Western Iberia Buoyant Plume (WIBP; Péliz *et al.*, 2002) is an all-year-round low salinity water lens that extends along the Northwest Iberia coastal area due to the accumulation of several fresh water sources, such as the Douro, Minho and Mondego rivers along with other smaller rivers and the Galician Rias. According to Brito *et al.* (2015), the area comprised between the Mondego and the Minho River (Fig. 1) receives around 45000 Hm<sup>3</sup>year<sup>-1</sup> corresponding to 55% of the total volume of water discharged in the Portuguese coast. Since its first description, the WIBP has been subject of the several research studies related to ocean productivity (i.e. Ribeiro *et al.*, 2005; Picato *et al.*, 2014) and larvae and eggs dispersal (i.e. Queiroga *et al.*, 2007).

The main objective of the present research and of the methodology described in Campuzano *et al.* (2016) was to explore the capacity to improve the thermohaline circulation in coastal areas by a better characterisation of the land-ocean boundary conditions, with special regard to the salinity fields. This is the final chapter of a set of research publications where the different components of the methodology (Campuzano *et al.*, 2016) were analysed including the adaptation and implementation of state-of-the-art hydrological models to multi-catchment modelling domains

(Brito *et al.*, 2015) and the off-line extraction and analysis of estuarine fluxes properties in order to be integrated, including their temporal evolution, into regional mesoscale grids (Campuzano *et al.*, 2018). In this work, the impact of the numerical implementation of 44 rivers, eight of them using estuarine model applications, in a regional model for western Iberia will be analysed for the period 2011-2015.

### 2. METHODS

#### 2.1 Numerical modelling

In this work the regional ocean model for western Iberia PCOMS (Portuguese Coast Operational Modelling System; Campuzano, 2018) was coupled in an offline mode with estuarine and watershed modelling applications in order to evaluate their impact in the thermohaline circulation fields. The PCOMS is a 3D full baroclinic hydrodynamic and ecological regional ocean model application that downscales the Mercator-Océan PSY2V4 North Atlantic solution (Drillet *et al.*, 2005) using the MOHID Water model (<http://www.mohid.com>; Neves, 2013).

The main objective of this work was to evaluate the land-ocean boundary implementation following the methodology described in Campuzano *et al.* (2016) in Western Iberia. A total of 44 rivers were implemented: 8 of them, ordered from North to South: Minho, Lima, Douro, Vouga (Ria de Aveiro), Mondego, Tagus, Sado and Guadiana, were included as estuarine fluxes in the regional ocean application. Detailed information related to the estuarine models,

their forcing and the cross-section location where fluxes were obtained can be found in Campuzano *et al.* (2018). The other 36 rivers were imposed directly as continuous discharges using flow and temperature from the MOHID Land watershed model application (Brito *et al.*, 2015) and a constant salinity value of 32. This approach was adopted to take into consideration the tendency of watershed models to overestimate flows and avoid the excess of fresh water. For this reason, the salinity signature from some large rivers in the regional model, such as the Guadalquivir River, could be underrepresented.

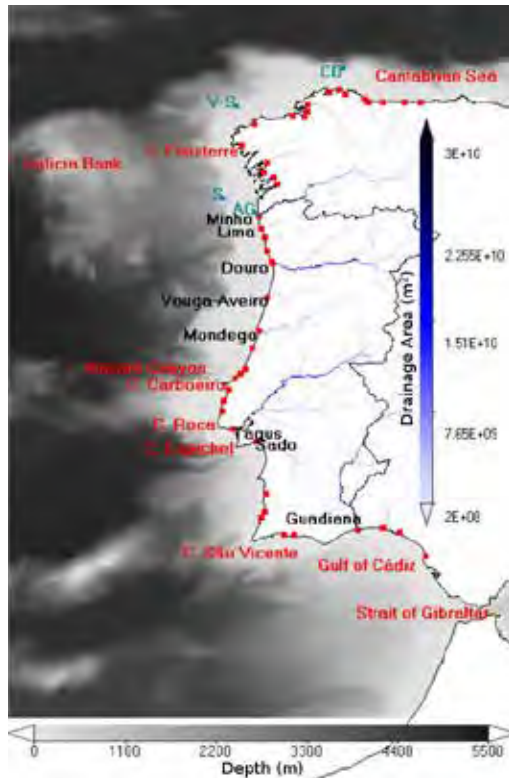


Fig. 1. Portugal domain bathymetry from the PCOMS application and drainage area from the MOHID Land WI domain. The location of the 44 river discharges implemented are marked with red squares and the rivers implemented with estuarine applications have their name next to its discharge location. Some ocean and coastal features from the Western Iberia region are displayed in red. The monitoring buoys used for model validation are displayed in light blue using an acronym: EB - Estaca de Bares, V-S - Villano-Sisargas, S - Silleiro Buoy and AG - A Guarda.

## 2.2 In situ observations

CTD surface data from two spring cruises in 2011 and 2015, hereafter referred as PELAGOS11 and PELAGOS15 cruises respectively, performed by the Portuguese Institute for Sea and Atmosphere, I.P. (IPMA) were made available for this study. Multiparametric buoys equipped with salinity sensors in Spanish waters, near the northern Portuguese boundary, were also used for validation since permanent monitoring stations observing salinity were absent/unavailable in the Region of Fresh Water Influence (ROFI) in Portugal.

## 3. RESULTS

### 3.1 Model comparison with cruise data

The PCOMS salinity results presented a similar salinity pattern than the PELAGOS11 CTD data where a meridional SSS gradient was interrupted by the two low salinity areas corresponding to the Tagus estuary plume, including its northward transport, and the WIBP in the northern sector.

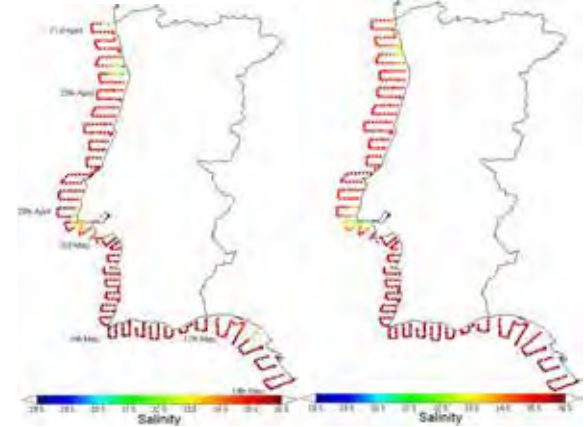


Fig. 2. Surface salinity observed with CTD during the PELAGOS11 cruise (left) and the PCOMS (right) modelling results.

### 3.2 Extreme event case study: April 2013

On early spring of 2013, a severe rain event affected the Western Iberia territory reaching maximum peak flows around  $4500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  in the Douro River on the 30<sup>th</sup> of March and around  $5400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  in the Tagus River on the 2<sup>nd</sup> of April (Campuzano *et al.*, 2018).

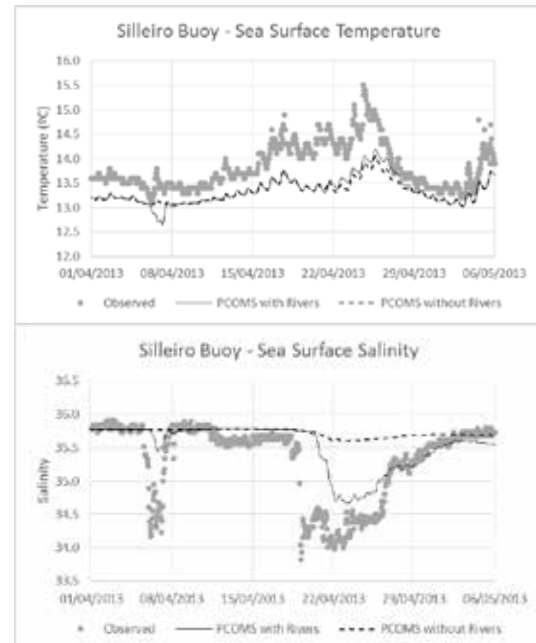


Fig. 3. Sea surface temperature (top) and sea surface salinity (bottom) at Silleiro buoy for the period 1<sup>st</sup> of April-6<sup>th</sup> of May 2013. Modelling results are displayed with (PCOMS with Rivers) and without rivers (PCOMS without Rivers) forcing.

During this period, the Silleiro buoy (Fig. 1) recorded salinity values below 34 (Fig. 3). On the 6<sup>th</sup>

of April the observed salinity and temperature decreased by the arrival of WIBP waters. On the 19<sup>th</sup> of April, a second decrease in salinity was observed along with a SST increase. This temperature increase was reproduced by the PCOMS with and without river implementation while salinity decrease could only be reproduced by the PCOMS version including the river discharges. For this reason EO SST can be regarded as an inadequate tool to monitor the WIBP since the shallow and stable plume acquires rapidly the thermal signature of the surrounding waters (Ribeiro *et al.*, 2005). Correspondence between observed and the modelling results can be observed though there is room for improving the timing and intensity in the salinity field (Fig. 3).

### 3.3 Climatologic and seasonal analysis

The mean annual salinity distribution in the Western Iberian regional ocean for the period 2011-2015 is illustrated in Figure 4. Two areas influenced by fresh water inputs can be clearly distinguished: the WIBP that includes the coastal area from the Mondego estuary mouth up to the Galician rias and the Tagus-Sado estuarine plumes area, hereafter referred as West Iberia Central Plume (WICP) that extends from Cape Espichel until Cape Carvoeiro. Between these two areas, in the neighbouring waters of the Nazaré canyon, mean salinity values slightly saltier than open ocean waters, though this area present a high seasonal variability.

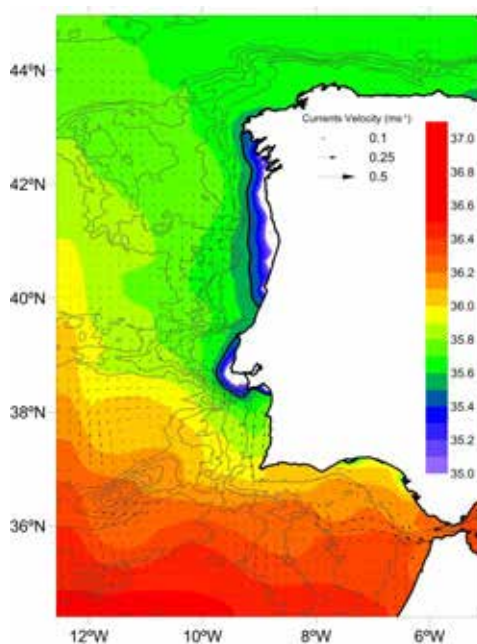


Fig. 4. Mean sea surface salinity for the period 2011-2015. The thick black line indicates the WIBP salinity upper limit (35.5) and white values indicate salinity values below 35. Vectors represent mean current intensity and direction every third cell.

In addition to the runoff variation, the prevailing wind regime in each season influences the WIBP distribution since it is transported offshore with northerly winds and converges to the coast with

southerlies (Peliz *et al.*, 2002; Ribeiro *et al.*, 2005). Nevertheless, during winter and spring conditions, Tagus and Sado estuary plumes were connected with salinity values below 35.5 (Fig. 5). The WICP influence during this period extended further than Cape Carvoeiro and entered the Nazaré Canyon area. During wet years, such as 2011 and 2013, the WIBP and the WICP joined forming a continuous plume (not shown; Campuzano, 2018).

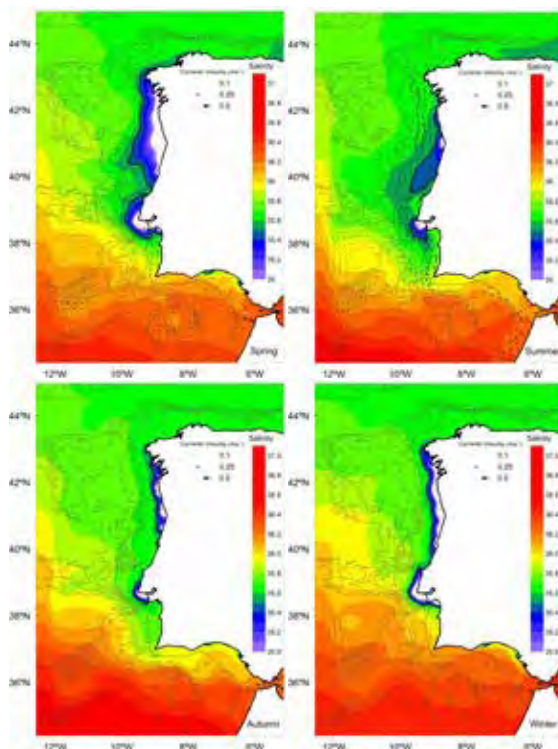


Fig. 5. Seasonal mean sea surface salinity for the period 2011-2015. The thick black line indicates the WIBP salinity upper limit (35.5)

During typical winter conditions, the prevailing downwelling favourable winds from the south-west generate convergent transport towards the coast and the WIBP remain in the inner shelf and rivers feed a coastally trapped branch of the poleward current advecting low salinity waters (Relvas *et al.*, 2007; Picado *et al.*, 2014). During the upwelling conditions, the Ekman surface plume is transported offshore and advected along the shelf (Santos *et al.*, 2004; Relvas *et al.*, 2007). During autumn several surface salinity minima are located around the estuarine mouth and poleward circulation dominates in the inner shelf reaching the Galician rias. The winter season increases the volumes discharged in the coastal areas and the salinity values below 35 occupy the inner shelf from the Mondego River up to the Galician Rias and the WIBP influence extends further than Cape Finisterre. During spring, the relaxation of northern winds, the abundance of less salty water in the coastal area and the beginning of upwelling-dominated wind conditions spread the WIBP off the continental shelf and equatorward, as part of the upwelling induced current, occupying a

large area of the Portuguese continental platform near the Nazaré Canyon area.

#### 4. CONCLUSIONS

Due to the *in situ* monitoring low frequency, numerical modelling is currently the only tool able to represent and estimate the temporal and spatial scale of coastal salinity fronts, such as the WIBP. Taking into consideration the numerical modelling limitations and assumptions, the salinity modelling results provided by the methodology described in Campuzano *et al.* (2016) improved significantly salinity fields and aid to the delimitation of region of fresh water influence and salinity fronts. Overall results were in agreement with the observed values and were able to represent WIBP features described in the bibliography.

A description of the temporal and spatial variability of the seas surface salinity was provided by generating an annual and seasonal climatology. The climatological analysis served to describe the WIBP evolution along all the year and its interannual variability since most of previous studies focused on particular seasons or field surveys.

On this work, the author noticed the presence in western Iberia of a second merged plume, along with WIBP, resulting from the contribution of the Tagus and Sado estuaries, named West Iberian Central Plume (WICP). According to the modelling results, the WICP could connect with the WIBP and generate a common salinity front covering most of the Western Iberian coasts.

In order to confirm the existence of the WICP and its influence, as the modelling results suggest, observations covering this area around the year would be needed.

#### Acknowledgements

This research is a contribution for the iFADO project funded from ERDF funds of the INTERREG Atlantic Area Programme under contract EAPA\_165/2016. The authors want to thank M.M. Angélico and P. Oliveira for providing the IPMA cruise data that served to evaluate the modelling results.

#### REFERENCES

- Brito, D., Campuzano, F.J., Sobrinho, J., Fernandes, R. and Neves, R. (2015). Integrating operational watershed and coastal models for the Iberian Coast: Watershed model implementation – A first approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167, Part A: 138-146.
- Campuzano, F. (2018). Coupling watersheds, estuaries and regional seas through numerical modelling for Western Iberia. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal. Available at: [http://www.mohid.com/PublicData/products/Thesis/PhD\\_Francisco\\_Campuzano.pdf](http://www.mohid.com/PublicData/products/Thesis/PhD_Francisco_Campuzano.pdf)
- Campuzano, F., Brito, D., Juliano, M., Fernandes, R., de Pablo, H. and Neves, R. (2016). Coupling watersheds, estuaries and regional ocean through numerical modelling for Western Iberia: a novel methodology. *Ocean Dynamics*, 66(12): 1745–1756.
- Campuzano, F.J., Juliano, M., Sobrinho J., de Pablo, H., Brito, D., Fernandes, R. and Neves, R. (2018). Coupling Watersheds, Estuaries and Regional Oceanography through Numerical Modelling in the Western Iberia: Thermohaline Flux Variability at the Ocean-Estuary Interface. In: W. Froneman (Ed). *Estuary*. InTech, Rijeka, Croatia, 1-17.
- Drillet, Y., Bourdalle-Badi, R., Siefrid, L. and Le Provost, C (2005). Meddies in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model. *Journal of Geophysical Research*, 110(C3): C03016.
- Neves, R. (2013). The MOHID concept. In: M. Mateus & R. Neves (eds.). *Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. IST Press, Lisbon, Portugal, 1-11.
- Peliz, Á., Rosa, T.L., Santos, A.M.P. and Pissarra, J.L. (2002). Fronts, jets, and counter-flows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of Marine Systems*, 35(1-2): 61-77.
- Picado, A., Alvarez, I., Vaz, N., Varela, R., Gomez-Gesteira M and Dias, J.M. (2014). Assessment of chlorophyll variability along the northwestern coast of Iberian Peninsula. *Journal of Sea Research*, 93: 2-11.
- Queiroga, H., Cruz, T., dos Santos, A., Dubert, J., González-Gordillo, J.I., Paula, J., Peliz, Á. and Santos, A.M.P. (2007). Oceanographic and behavioural processes affecting invertebrate larval dispersal and supply in the western Iberia upwelling ecosystem. *Progress in Oceanography*, 74(2-3): 174-191.
- Relvas, P., Barton, E.D., Dubert, J., Oliveira, P.B., Peliz, Á., da Silva, J.C.B., Santos, A.M.P. (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, 74(2–3): 149-173.
- Ribeiro, A.C., Peliz, Á. and Santos, A.M.P. (2005). A study of the response of chlorophyll-a biomass to a winter upwelling event off Western Iberia using SeaWiFS and *in situ* data. *Journal of Marine Systems*, 53(1-4): 87-107.

# Measuring wave breaking height from video: a novel methodology applied to surfcam images

U. Andriolo (1), R. Taborda (1), D. Mendes (2), E. Sánchez-García (3)

- (1) IDL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. E-mail: [uandriolo@fc.ul.pt](mailto:uandriolo@fc.ul.pt)  
 (2) IST-LNEC-IH, Lisbon, Portugal  
 (3) CGAT Group, Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

**Abstract:** The wave height at the breaking point is a crucial parameter for coastal studies. This work presents a novel methodology for estimating wave breaking height by using a video remote sensing technique. The method uses the wave breaking point locations detected on Timestack images as an effective proxy of the wave height. The technique was applied to surfcam images retrieved at Ribeira d'Ilhas, at the western Portuguese coast. Comparison with results of a calibrated numerical model showed an average error lower than 16% in the estimates during two days, with the wave height at the breaking point varying between 1 m and 3 m.

**Key words:** hydrodynamics, remote sensing, surf zone, shore platform

## 1. INTRODUCTION

Breaker height is an essential component of wave forcing for a wide variety of coastal engineering applications including the estimation of coastal vulnerability and wave runup (Andriolo *et al.*, 2016). Direct measurements of wave height in the breaking zone are complex due to the difficulties related to the installation of instrumentation during high energetic events. This is especially true for sandy coasts, where bottom dynamics generally does not allow safe mooring of instrumentation (e.g. pressure gauges or Acoustic Doppler Current Profilers).

Wave models are widely used to estimate the wave breaking height at the coast. Numerous methods and relationships have been presented and published, which, in general, found the ratio between the wave breaking height and the water depth as function of the bottom slope and offshore steepness. Robertson (2014) and Camenen and Larson (2007) provide a review on empirical models to estimate wave height. Most of wave empirical breaking models were derived using data from laboratory experiments, in which hydro- and morphological conditions were strictly under control. Applied on a random sea state in the field, results are subjected to uncertainties by reproducing the several processes occurring in the surf zone.

Video monitoring has been proven as a cost-effective technique for estimating wave breaking height in the coastal zone. Several works used oblique Timestacks produced from images collected in the field (Robertson, 2014; Shand *et al.*, 2012; Gal *et al.*, 2011), and applied photogrammetric corrections to estimate wave breaking height. On the contrary, Almar *et al.* (2012) used rectified Timestacks. The estimation of the wave height at the breaking point ( $H_b$ ) relied on the photogrammetric relation between

the breaking point, wave roller length and camera position. The method was validated with data collected in wave tank experiments, with high-frequency video-data sampling (25 Hz) and indoor light conditions. Nevertheless, it also showed satisfactory results ( $r^2=0.7$ ) when it was applied with video data acquired in the field (Angnuureng *et al.*, 2016). The fundamental image processing procedures dedicated to wave breaking extraction and wave roller length estimation (Almar *et al.*, 2012) require the intensity threshold calibration and depend on image pixel quality.

The main objective of this work is to describe a simple remote sensing Timestack-based technique to estimate wave breaking height.

## 2. METHOD

### 2.1. Study site

The collaboration with the company Surftotal ([www.surftotal.com](http://www.surftotal.com)) allowed the use of the surfcam installed at Ribeira d'Ilhas (Fig. 1). The video camera is mounted on a house roof, distancing approximately 400 m to the shoreline of Ribeira d'Ilhas beach, at a height of about 80 m above Mean Sea Level (MSL).



Fig. 1. Image from study site a) image acquired by surfcam and pressure transducers positions (yellow triangles, detail in box). b) Ribeira d'Ilhas beach location on Portuguese map.

Camera view was set steady looking at the shore platform of Ribeira d'Ilhas for two days (28<sup>th</sup> and 29<sup>th</sup> of March 2017). LiDAR survey (Silva *et al.*, 2012)

data were coupled to RTK-GPS measurements to characterize the nearshore bathymetry up to a depth of about 11 m. The rocky-shore platform had a low gradient slope (1%) between 0 and 1.5 m depth. Four Pressure Transducers (PTs) Leveltroll were placed along a cross-shore transect with an offset of ~18 m (Fig.2) to measure the near bottom pressure during the experience. Offshore wave data were provided by the WaveScan buoy Monican (Fig. 2) deployed at 80 m depth and at coordinates (39.56N, 9.21E) by the Portuguese Hydrographic Institute (www.hidrografico.pt).

## 2.2. Timestack images

Image sequences acquired from the surfcam at Ribeira d'Ilhas were processed by *C-Pro* (Sanchez-Garcia *et al.* 2017) to find camera properties. COSMOS (Taborda and Silva, 2012) was used to rectify the images. One Timestack generated sampling pixel on images over the transect coinciding with the PTs cross-shore array was chosen to study the breaking wave process in the surf zone. The incipient breaking point on Timestack can be identified as the first point in which a white pixel appears due to the formation of wave roller and turbulence associated to wave breaking process.

Breakpoints were manually marked on the image (Fig.2), with the purpose of analyzing their spatial variability in the surf zone. Considering that at most beach profiles water depth decreases from offshore to inshore, it is assumed from hereafter that the higher waves break farther from the shoreline, whereas smaller waves break closer to the shore. Following this assumption, wave breaking position statistics (Fig. 2) were computed from the number of incipient points manually picked on Timestacks.

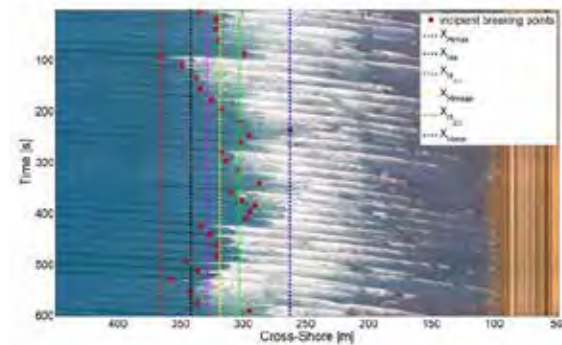


Fig. 2. Breakpoints locations (red circles) and computed breakpoints position statistics (dashed lines) superimposed on Timestack

Particular attention was drawn to the statistical positions of significant breakpoints  $X_{H_s}$ , and the most shoreward breakpoint  $X_{H_{min}}$ .

## 2.3. Conceptual model

A conceptual model to relate image characteristics with breaker height was built starting from the expression of the bottom slope:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad Eq.1$$

where  $m$  is the slope ( $=\tan\beta$ ) and,  $\Delta y$  and  $\Delta x$  respectively the differences in elevation and planimetry. If the formula is applied at two successive wave breaking positions (Fig. 3), the expression becomes:

$$m = \frac{h_{b1} - h_{b2}}{L} \quad Eq.2$$

where  $h_{b1}$  and  $h_{b2}$  are the water depths at the two breaking points, and  $L$  is the distance between both breaker locations.

Applying such simple relation to the case of the positions found through the statistical analysis of the incipient breaking points:

$$m_{H_s} = \frac{h_{b,H_s} - h_{b,H_{min}}}{L_{H_s}} \quad Eq.3$$

where  $m_{H_s}$  is the average bottom slope under breaking conditions,  $h_{b,H_s}$  and  $h_{b,H_{min}}$  are the water depths respectively at breaking under  $X_{H_s}$  and  $X_{H_{min}}$ , and  $L_{H_s}$  is the distance between  $X_{H_s}$  and  $X_{H_{min}}$  positions expressed as :

$$L_{H_s} = X_{H_s} - X_{H_{min}} \quad Eq.4$$

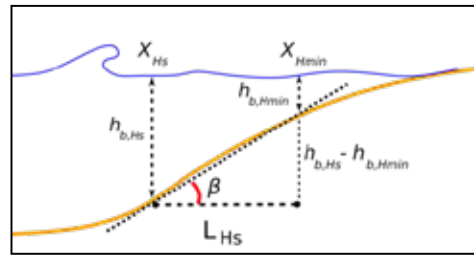


Fig. 3. Conceptual model sketch. Yellow line represents the beach profile and blue line the water level.

Eq. 2 can also be re-formulated as:

$$h_{b,H_s} - h_{b,H_{min}} = m_{H_s} * L_{H_s} \quad Eq.6$$

and solving for  $h_{b,H_s}$  and introducing  $\delta$ :

$$h_{b,H_s} \cong \frac{1}{\delta} * m_{H_s} * L_{H_s} \quad Eq.7$$

where

$$\delta = 1 - \left( \frac{h_{b,H_{min}}}{h_{b,H_s}} \right) \quad Eq.8$$

At breaking point, the relation between wave height and water depth can be expressed by:

$$\frac{H_b}{h_b} = \gamma \quad Eq.9$$

where  $H_b$  is the wave breaking height,  $h_b$  is the water depth at the breaking, and  $\gamma$  is the breaker index.

If it is assumed that  $\gamma$  has the same value at both breaker points, Eq. 7 becomes:



$$H_{sb} \cong \frac{1}{\delta} * m_{Hs} * L_{Hs} * \gamma \quad \text{Eq.10}$$

expressing the wave breaking height proportional to the ratio between water depths at breaking locations  $\frac{h_{b,Hs}}{h_{b,Hs}-h_{b,Hmin}}$  (re-formulated Eq.8), the distance between the two breakpoints  $L_{Hs}$ , the beach slope  $m_{Hs}$  under  $L_{Hs}$ , and the dimensionless  $\gamma$  breaker index.

#### 2.4. Wave breaking height

Wave breaking height was achieved solving Eq. 10 using the hydro- and morphodynamic parameters retrieved from the image analysis. Distance  $L_{Hs}$  was computed following Eq. 4 and the points found by the statistical analysis of breakpoints. Water depths at breaking  $h_{b,Hs}$  and  $h_{b,Hmin}$  were extracted interpolating the breakpoints statistics positions with the bathymetric profile. The beach slope  $m_{Hs}$  under breaking conditions was determined interpolating the limits of length  $L_{Hs}$  to the sea bottom profile. The breaker index was chosen  $\gamma = 0.55$  following the analysis in Yoo (2007).

#### 2.5. Swash model

The SWASH numerical model (Zijlema *et al.*, 2011) was used to simulate wave breaking height over the profile during video-acquisition period.

SWASH is based on the nonlinear shallow water equations with the non-hydrostatic assumption. This model is capable to predict the wave transformation and propagation from offshore until the swash zone.

The model grid set up reproduced the Timestack properties, with a cross-shore grid size of 1 m over the beach profile, an initial time step of 0.001 seconds and a time duration for the numerical simulation of 600 seconds. A weakly-reflective boundary condition was applied at the offshore boundary, and a radiation condition was set at the shoreward boundary to minimize the effect of wave reflection.

Numerical simulations with the SWASH model were calibrated with the significant wave height estimated by the four pressure transducers installed in the surf zone. The calibration procedure was performed with the objective of finding the best Manning coefficient ( $n$ ) that minimizes the bias between measured and simulated significant wave heights. The best Manning's value representing the rocky platform was found as  $n=0.07$ . The coefficients for breaking initiation ( $\alpha$ ) and breaking cessation ( $\beta$ ) were set to 0.6 and 0.3, respectively.

SWAN model was first used to propagate the offshore wave spectrum parametrized with buoy measurements (significant wave height  $H_o$  and peak period  $T_p$ ) from the offshore to the offshore boundary in the cross-shore profile of SWASH model. Water level  $\eta$  was taken from measurements of the most seaward pressure transducer installed in the surf zone.

Among the results of SWASH model, significant wave weight over the profile was computed as

$$H_{sb,SWASH} = 4 * std(ws) \quad \text{Eq.11}$$

where  $std(ws)$  was the standard deviation of the sea-surface elevation time series resulted from each of the numerical model runs.

### 3. RESULTS

Fig. 4 shows the measurements at the  $X_{Hs}$  against SWASH model simulations for both days. Wave breaking height was computed for the 94 Timestacks produced over 2 days, resolving Eq. 10 with automatically video-derived parameters  $L_{Hs}$ , the ratio  $h_{b,Hs}/h_{b,Hmin}$ , the beach slope  $m_{Hs}$  and the breaker index  $\gamma$ . The SWASH model was capable of reproducing the measured significant wave height at transducer position, therefore it was considered adequate for validation the video-derived  $H_b$ .

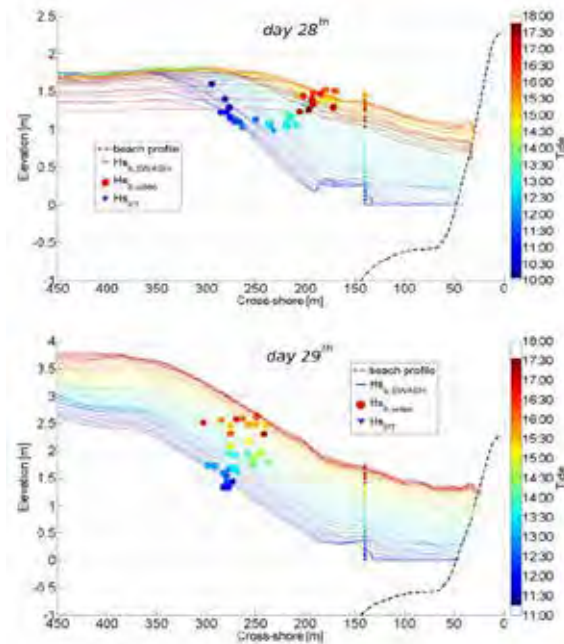


Fig. 4. Significant wave breaking height  $H_{sb,VIDEO}$  (filled circles), plotted at the related  $X_{Hs}$ , against significant wave breaking height  $H_{sb,SWASH}$  (colored lines). Column of colored triangles at  $x=150$  m shows the wave significant height measured by the most seaward pressure transducer. Colors refer to tidal level.

To evaluate video-derived wave breaking height performance,  $H_{sb,VIDEO}$  was compared to  $H_{sb,SWASH}$  extracted at  $X_{Hs}$ . The overall Root Mean Square Error (RMSE) error was equal to 0.29 m, higher on day 29<sup>th</sup> and smaller on day 28<sup>th</sup>. (Table I).  $H_{sb,SWASH}$  varied between 1 m and a maximum of 3.3 m, hence Normalised Root mean Square Error (NRMSE) of video-derived  $H_{sb,VIDEO}$  ranged between 10% and 16% during the first and second day, respectively.

Table I: Errors between  $H_{s_b,VIDEO}$  and  $H_{s_b,SWASH}$ .

	Median	MSE	RMSE	NRMSE
28th	0.04 m	0.02 m	0.16 m	10%
29th	0.2 m	0.14 m	0.38 m	16%
dataset	0.14 m	0.08 m	0.29 m	14%

Fig. 5 presents the final results compared with buoy measurements. While on day 28<sup>th</sup> wave breaking height was measured properly by the pressure transducers, on day 29<sup>th</sup> the instruments just measured wave bore height travelling in the inner surf zone, since wave breaking occurred further seaward. This suggests that remote sensing video-monitoring technique would add a significant improvement in describing nearshore hydrodynamics.

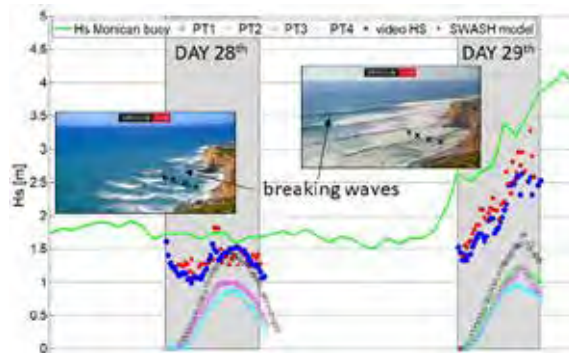


Fig. 5. Significant wave breaking height measured by buoy (green line) pressure transducers (empty squares), modelled (filled red circles) and video-derived (filled blue circles). Image frames are inserted to show PTs locations (black crosses) and breaking waves positions indicated by black arrows.

#### 4. CONCLUSIONS

The remote sensing approach proposed in this work for wave breaking calculation was successfully applied and showed satisfactory results. In contrast with previous  $H_b$  predictors from video, the proposed techniques are based on incipient breaking point location. Further work will focus on the automated detection of breakpoints exploiting the statistical properties of pixel intensity on Timestack.

#### Acknowledgements

Umberto Andriolo was supported by the EARTHSYSTEM Doctorate Programme led by Institute Dom Luiz Associate Laboratory (IDL) at the University of Lisbon (SFRH/BD/52558/2014). The authors gratefully acknowledge the contribution of Dr. C.F.Lira (IDL,FCUL) and Dr. A. Fortunato (LNEC) during fieldwork. We are also in debt to Pedro Almendra (www.surftotal.com) for camera set up and acceptance in collaborating to this study. The authors are grateful for the financial support provided by FCT thought project UID/GEO/50019/2013.

#### REFERENCES

Andriolo, U., Taborda, R., Sanchez-Garcia, E. (2016). Measuring wave runup and intertidal beach

topography from online streaming surfcam. *X Jornadas do Mar*, Naval School of Lisbon, Lisbon, Portugal

Almar, R., Cienfuegos, R., Catalán, P. A., Michallet, H., Castelle, B., Bonneton, P., Marieu, V. (2012). A new breaking wave height direct estimator from video imagery. *Coastal Engineering*, 61(1), 42–48.

Angnuureng, D. B., Almar, R., Addo, K. A., Castelle, B., Senechal, N., Laryea, S. W., Wiafe, G. (2016). Video observation of waves and shoreline change on the microtidal James town beach in Ghana. *Journal of Coastal Research*, 1(75), 1022–1026.

Camenen, B., and Larson, M. (2007). Predictive Formulas for Breaker Depth Index and Breaker Type. *Journal of Coastal Research*, 23, 1028–1041

Gal, Y., Browne, M., Lane, C. (2011). Automatic estimation of nearshore wave height from video timestacks. In *Proceedings - 2011 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, DICTA 2011*.

Robertson, B. R. D. (2013). *Remote Measurement and Analysis of Shallow Water Breaking Wave Characteristics*. PhD dissertation, Engineering, University of Guelph, Ontario, Canada

Sánchez-García, E., Balaguer-Beser, A., Pardo-Pascual, J. E. (2017). C-Pro: A coastal projector monitoring system using terrestrial photogrammetry with a geometric horizon constraint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 255–273.

Shand, T. D., Bailey, D. G., Shand, R. D. (2012). Automated Detection of Breaking Wave Height Using an Optical Technique. *Journal of Coastal Research*, 282, 671–682.

Silva, M., Patrício, P., Mariano, A., Morais, M. e Valério, M. (2012). Obtenção de Dados LiDAR para as Zonas Costeiras de Portugal Continental. *2<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisbon, Portugal

Taborda, R., and Silva, A. (2012). COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system. *Computers and Geosciences*, 49, 248–255.

Zijlema, M., Stelling, G., Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992–1012.

Yoo, J. (2007). *Nonlinear Bathymetry Inversion Based on Wave Property Estimation from Nearshore Video Imagery*. PhD dissertation, Georgia Institute of Technology.

## First evidences of internal wave generation in SE of Madeira Island

R. Caldeira <sup>(1,2)</sup> M. Bruno <sup>(3)</sup> J. Reis <sup>(4)</sup> J.J. Gomiz-Pascual <sup>(4)</sup> R. Vieira <sup>(1)</sup> G. Navarro <sup>(5)</sup>

- (1) Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação Tecnologia e Inovação (ARDITI), Observatório Oceânico da Madeira (OOM), Funchal, Madeira, Portugal (rui.caldeira@oom.arditi.pt)
- (2) Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal
- (3) Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales Universidad de Cádiz
- (4) Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, Spain
- (5) Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC), Cadiz

**Abstract:** In coastal regions the interaction of tidal currents with seamounts or sills often generate internal wave (IW) activity with important biological implications. In a stratified ocean, hydraulic jumps can contribute to the generation of internal bores, which can shift from the upstream to the downstream side of a sill, in synchrony with the tidal flow. Different dynamical regimes however can cause downslope (supercritical,  $Fr > 1$ ) and upwelling (subcritical,  $Fr < 1$ ) currents to form over the sill. Solitons were also observed shedding leeward of the generation site. The first evidences of internal wave activity in the SE of Madeira Island, combines data from radar images, *in situ* campaigns and moored instruments. Spectral analysis showed 6-8h periods, for the peak IW activity, just after the ebb phase, during spring-tides. Cross wavelet analysis showed a strong coherence between current speed and tidal flow.

**Keywords:** short-period IW, solitons, internal bores, solibores, wakes

### 1. INTRODUCTION

In coastal regions the interaction of tidal currents with seamounts or sills are often associated with the generation of internal waves (IW) with important biological implications (Farmer & Smith, 1980; Holligan *et al.*, 1985). In a stratified ocean, hydraulic jumps can contribute to the generation of internal bores, which can shift from the upstream to the downstream side of a sill in synchrony with the tidal flow (Cummins *et al.*, 2003). In the lee of these bores, solitons can be released (a.k.a. ‘solibores’). In fact, Maxworthy (1979), laboratory experiments proposed the first model for the generation of nonlinear or solitary waves (a.k.a. solitons) that is often used to explain the nature of tidal flows over sills and/or submarine ridges. His experiments showed the formation of large pycnocline depressions on the downstream side of the sill (‘bores’). As the tide slackened, the pycnocline depression advanced and disintegrated into a group of rank-ordered solitons. However, considering that perturbations in a stratified fluid generate internal waves in a wide frequency range, the study of IW rarely depends on a single methodology, most often it combines the use of satellite data, (from radar and optical sensors, e.g. Alpers, 1985; Da Silva *et al.*, 2002), with *in situ* observations (Morozov *et al.*, 2011) and numerical modelling.

The underwater ridge that connects Madeira and Desertas Islands (32°N; 17°W), rises from 1000m to about 100m, below the surface, in an area with 10km wide. Internal wave activity has been observed in the

region using satellite radar imagery (figure 1). Nevertheless, the first *in situ* evidences of internal bore formation and hence suggesting the sill as one possible generation site it was not collected until March 2014, during the ‘Poseidon-466’ oceanographic campaign. Most recently, during the first Oceanic Observatory of Madeira (OOM) campaign (August 2017), OOM teamed up with researchers from the University of Cadiz in order to install a moored ADCP at the sill-top to profile currents and monitor the generation mechanism of these internal waves. Results discussed herein are the very first record of IW activity in the region: from its birth to the leeward propagation.



Fig. 1. Sentinel-2 radar image, from 18<sup>th</sup> July 2016 showing the nascent location of solitons over the sill, and IW packets propagating upstream.

## 2. DATA & METHODS

In the scope of the research project "Madeira Archipelago Pre-seamount Stages, MAPS" the POSEIDON (R/V) research cruise P466 (2-18 March 2014), aimed at studying the meiofauna assemblages around seamounts and islands. Apart from the biogeochemical variables collected, some physical parameters were opportunistically recorded during the campaign. Those included: i) Conductivity Temperature Depth, measurements using a SBE911-plus CTD, fitted with oxygen (BackScat-II), and fluorescence sensors (Turner Cyclops-7TM). All sensors were calibrated a few months before the cruise. The raw CTD data were pre-processed following the recommended procedure for the SBE 911plus, using the SBE-Data-Processing software routines (McTaggart et al. 2010) ii) a ship mounted Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), the RDI Ocean Surveyor pinging at 75 kHz. A transect over the Madeira-Desertas sill collected 6-CTD stations (up to 1000m), and continuous ADCP measurements down to a maximum depth of 600m. ADCP data was processed with CODAS software (V2017.10.01-Python), bottom-track correction was applied to measurements shallower than 200m, whereas water-track corrections was applied to deeper measurements, using the ship's GPS signal.

During the OOM-2017 oceanographic campaign, a system fitted with an FlowQuest-600 ADCP emitting at 75 kHz, was moored at 126m (upward looking), on the top-side of the sill. ADCP sampled at 66.85 seconds intervals with a vertical resolution of 0.5m, with the first cell at 98m and the last one at 48.5m, from the surface. With such a very high vertical resolution, the 'FlowQuest' maintained an accuracy of the 0.25% i.e.  $\pm 2$  mm/s. Measurements were taken for about 3 months, starting the 17th of August 2017 at 18:05 pm. The processing of the data was done in two-steps: i) first, a low-pass filter was used on the north- and east-components of the velocity, in order to obtain a value for every 2-minutes, for each depth-bin; ii) secondly, the decomposition of the velocity (north- east-components) in Empirical Orthogonal Functions (EOFs) helped identify the most energetic modes of the oscillations, between 8-minutes and 2-hours (Candela *et al.*, 1990).

A fully coupled model COAWST - Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System was used to study the meteo-oceanographic conditions of the region during sampling. The WRF-Weather Research and Forecasting, was the atmosphere model used, forced at the boundaries by NCEP - National Centers for Environmental Prediction (NCEP)', namely the 'FNL - (Final) Operational Model Global Tropospheric Analyzes'. ROMS - Regional Ocean Modelling System, was the ocean circulation model used, forced with MERCATOR; whereas the wave model (WW3) was forced at the boundaries by NCEP WW3 forecasts.

## 3. DISCUSSING (SOME) OBSERVATIONS

As shown in figure 2, CTD measurements from the POS466 campaign over the sill showed the formation of an hydraulic jump, which moved the 26.76 isopycnal 50m (from 250 to 200m). This is consistent with the laboratory experiments of Rottman and Simpson (1989), whereby the formation of internal bores depended on the amplitude parameter  $R = hd/hu$ , where  $hu$  and  $hd$  are the thicknesses (shown in Fig. 2) of the active surface layer upstream and downstream of the jump, respectively. In our case, smaller values of  $R$  ( $\sim 0.9$ ), are associated with internal bores of the undular type (e.g., Farmer and Armi 1999b; Cummins *et al.* 2003).

Leeward of the sill (north-westward) a downslope flow transported surface water (rich in oxygen and chlorophyll), below the mixed layer (not shown). The most intense currents are also observed over and upstream of the sill (not shown).

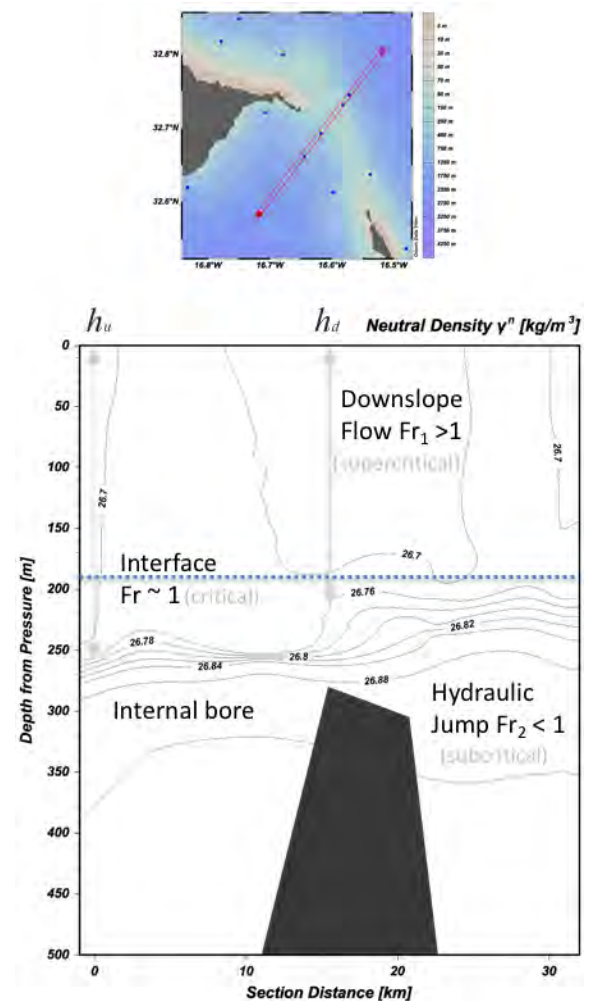


Fig. 2. Vertical section (shown in the map) of neutral density calculated from CTD (synoptic) measurements, carried out during the POS466 campaign over the Madeira-Desertas sill.

During the 2017 ADCP monitoring campaign, the effects of the stratification over the sill, become apparent. Surface flows often moved in opposite directions to the currents below the mixed layer

(~70m), both currents also changed intensity and direction with the flood and ebb of the tide. During slack-water however, currents were weak and homogeneously distributed throughout the water column (Fig. 3).

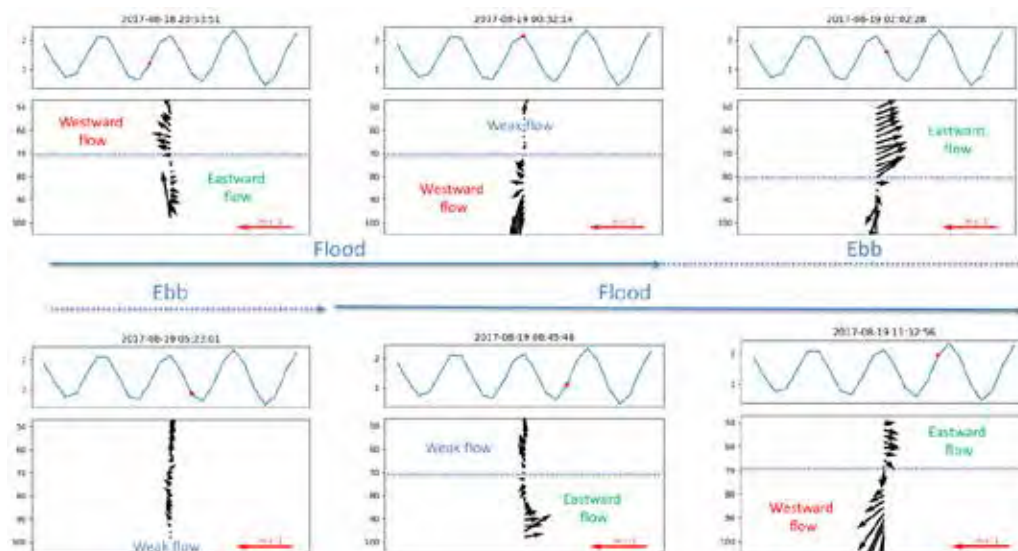


Fig. 3. Profiles of current during flood and ebb tides registered by the upper looking ADCP, moored over the sill. The upper-panels indicate the tidal measurements concurrent with the ADCP measurements, from Funchal tidal gauge.

In fact, when the tidal (barotropic) signals of the ADCP measured currents were decomposed using EOFs, individual solitons were observed

synchronously with the slack-water, i.e. when the current weakened and changed direction (Fig. 3). Solitons were released during spring-tides, but not during neaps, throughout the 3-month period.

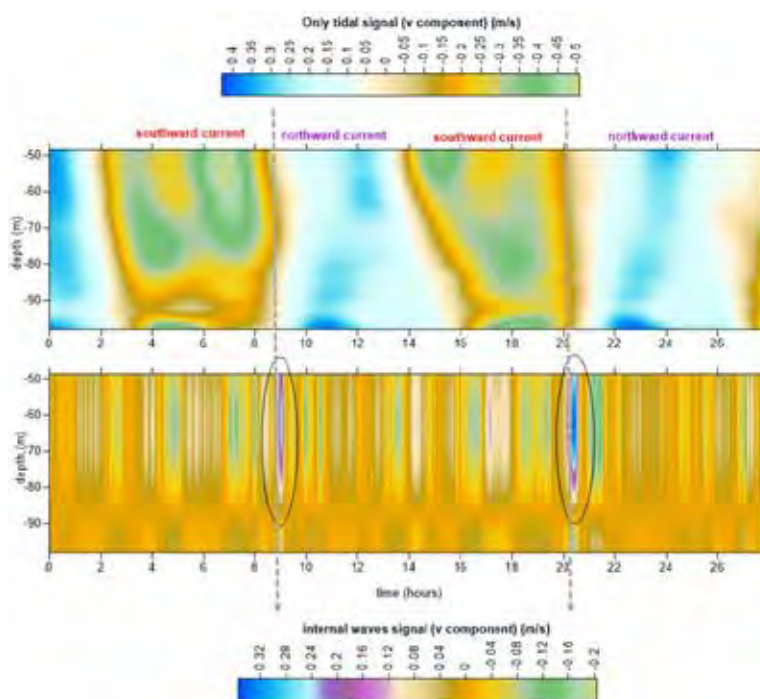


Fig. 4. EOF decomposition of the tidal signal (top panel); and v-component (bottom panel) of the velocity (measured by the ADCP, moored over the sill), over a 28hr period during spring-tide. Solitons release were noted during the change of current directions (south to the north) of the v-component of the current ('slack water').

#### 4. SCHEMATICS & MODELING

In brief, the cartoon below (Fig. 5) illustrates the main processes that seem to control the internal wave generation over the Madeira-Desertas sill. First an internal-bore is formed, during the strong westward phase of the tidal current (Fig. 5a). When the westward phase of the tide weakens enough, the bore goes over the sill, promoting a strong interaction with the seamount and this is when upwelling/dowelling takes place (Fig. 2). During the slack-tide, the bore is released as a ‘solibore’, and it propagates upstream (Fig. 5 b). This is also consistent with the coupled model calculations representative of the dynamic conditions of the study region (not shown). In fact, in the model, the 18°C isotherm oscillates violently (~150m) over the ridge during the passing and subsequent release of the internal-bore, throughout spring-tides.

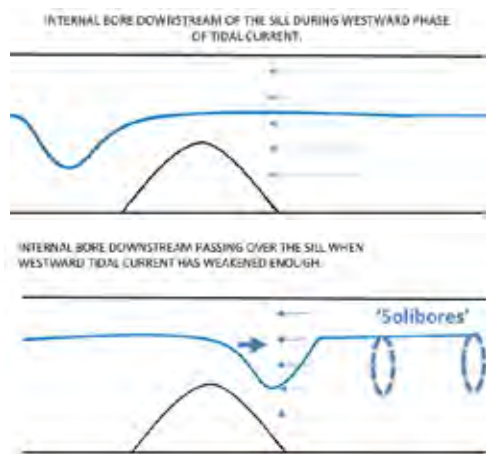


Fig. 5. Cartoon illustrating the internal bore generation (top) and downstream passing (bottom), during the strong and weak (slack water), phases of tidal current, including the release of the solibores.

To sum up the dynamics observed during the numerical simulations (not shown) it is useful to consider the Froude number given by:  $F_r = \pi u / 4\sqrt{g'h_r}$  where  $u$  is the average flow speed of the layer and  $g' = (\rho_r - \rho_s) / \rho_r$ , is the reduced gravity. Here,  $\rho_s$  is the value of the density at the surface layer and  $\rho_r$  is the density of a reference isopycnic whose depth, within the same layer, is  $h_r$ . Sharp density gradients that indicate the presence of the bore have supercritical  $F_r$  values ( $>1$ ), whereas critical ( $F_r \sim 1$ ) and subcritical ( $F_r < 1$ ), conditions are often found up/downstream of the sill where / when the vertical excursion of the isopycnals is weak. Nonetheless, supercritical conditions are dynamic in space and time, often modulated by the barotropic tidal currents. As the barotropic tidal forcing reaches its maximum, the supercritical region extends over the entire region between the bore and the leading edge of the sill. With the relaxation of the barotropic tidal flow,  $F_r$  decreases and the supercritical region contracts as the bore is released. Subcritical conditions therefore are reestablished in the wake of the advancing bores,

particularly during strong and moderately stratified events.

#### Acknowledgements

Data from the POS466 cruise was kindly made available by Kai Horst George, Senckenberg am Meer (Wilhelmshaven, Germany), who organized and provided funds for the cruise. We are grateful to the SOCIB crew for the help with the mooring of the ADCP. We would also like to thank the Portuguese Navy for the support provided in the recovery of the mooring. IH provided the processed tidal gauge data. We are also indebted to the Spanish Navy for the use of their acoustic releaser in the mooring. This study was partially supported by the Oceanic Observatory of Madeira Project (M1420-01-0145-FEDER-000001).

#### REFERENCES

- Alpers, W. (1985). Theory of radar imaging of internal waves. *Nature*, 314, 245–247.
- Candela, J., Winant, C.D., Ruiz, A. (1990). Tides in the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research* 95, 7317–7335.
- Cummins, P.F., Vagle, S. Armi, L. Farmer, D.M. (2003). Stratified flow over topography: upstream influence and generation of nonlinear internal waves. *Proc. R. Soc. Lond.* 459A, 1467–1487.
- Da Silva, J.C.B., New, A.L. Srokosz, M.A. Smyth, T.J. (2002). On the observability of internal tidal waves in remotely-sensed ocean colour data. *Geophys. Res. Lett.* 29 (12), 1569
- Farmer, D.M., Smith, J.D. (1980). Tidal interaction of stratified flow over the sill in Knight Inlet. *Deep-Sea Res.* 27A, 239–254.
- , and Armi, L. (1999). Stratified flow over topography: The role of small scale entrainment and mixing in flow establishment. *Proc. Roy. Soc. London*, 455A, 3221–3258.
- Holligan P.M., Pingree R.D. Mardell G.T. (1985). Oceanic solitons, nutrient pulses and phytoplankton growth. *Nature* 314:348–350.
- McTaggart, K. E., Johnson, G. C. Johnson, M. C. Delahoyde, F. M. & Swift, J. H. (2010). Notes on CTD/O2 data acquisition and processing using Sea-Bird hardware and software (as available). IOCCP Report No. 14, ICPO Publication Series No. 134: 1–10.
- Maxworthy, T. (1979). A note on internal solitary waves produced by tidal flow over a three-dimensional ridge. *J. Geophys. Res.* 84 (C1), 338–346.
- Morozov, E.G., Muzylev, S. V. Shestov, A. S. and Marchenko, A. V. (2011). Short-Period Internal Waves under an Ice Cover in Van Mijen Fjord, Svalbard, *Advances in Meteorology*, vol., Article ID 573269, 6 pages, 2011
- Rottman, J. W., and Simpson, J. E. (1989). The formation of internal bores in the atmosphere: A laboratory model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 115, 941–963.

## Extreme wave height events in Algarve (Portugal): comparison between HF radar systems and wave buoys

M. Fernandes (1), C. Fernandes (2), T. Barroqueiro (2), P. Agostinho (1) N. Martins (1) and A. Alonso-Martirena (1)

(1) Qualitas Instruments, Madan Parque, Rua dos Inventores, 2825-182 Caparica - Portugal, maria.fernandes@qualitasinstruments.com

(2) Hydrographic Institute, Rua das Trinas, 49 – 1249-093 Lisboa – Portugal

**Abstract:** The Southwestern Portuguese coast (SW Portugal) is a region that has lately been affected by several strong events, directly influenced by the presence of low pressure systems over the mid-Atlantic Ocean with the periodic passage of storms that give rise to severe sea states. The objective of this study is to characterize two of the most extreme wave height events felt in the coast of Algarve over the wintertime of 2017-2018, by using *in situ* (reliable high-frequency radar wave parameters together with an offshore wave buoy data, both from Hydrographic Institute) and wave model observation (Copernicus). Special attention was focused on monitoring Ana and Emma storms —two of the major storms on record in the southwestern Portuguese coast during this last winter. Overall, the results reveal the significant accuracy of high-frequency radars and prove that a combined observational strategy can provide a comprehensive characterization of severe wave conditions in coastal areas.

**Key words:** HF radar, wave measurement, storm events.

### 1. INTRODUCTION

The Southwestern Portuguese coast (SW Portugal) facing the mid-Atlantic Ocean on the southwestern corner of the Iberian Peninsula (Figure 1a) is a region that has been strongly influenced by the presence of low pressure systems, namely in the winter of 2017-2018. Since it is a region with intense maritime traffic between the Atlantic and the Mediterranean (source: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centex:-12.0/centery:25.0.com>), a comprehensive characterization of the significant wave height ( $H_s$ ) events is required in order to minimize the associated risks, and increase marine safety in coastal waters. In this context, a multidisciplinary methodology based on the integration of *in situ* and remote sensed observations could constitute a useful approach to properly interpretation of the ocean state and its variability. As previous works have clearly revealed the importance of rigorous validation of operational wave forecasting systems (Sembiring et al., 2015; Carracedo et al., 2005) and the analysis of extreme wave height events using models (Bell et al., 2017; Gimarães et al., 2014) and shore-based high-frequency radar (HFR) (Atan et al., 2015; 2016), the objectives of this paper were to analyze the main features of extreme wave height events in Algarve over the wintertime of 2017–2018 by using HFR remote sensed 10-min wave parameters together with an *in situ* offshore buoy maintained by Hydrographic Institute and Copernicus wave model (Figure 1b).

Attention was focused on monitoring Ana and Emma storms. Although weakened to a tropical cyclone, they brought severe weather in terms of heavy rain, damaging gusts (up to  $120 \text{ km/h}^{-1}$ ), large waves, small

tornados and storm surges with consequent coastal flooding.

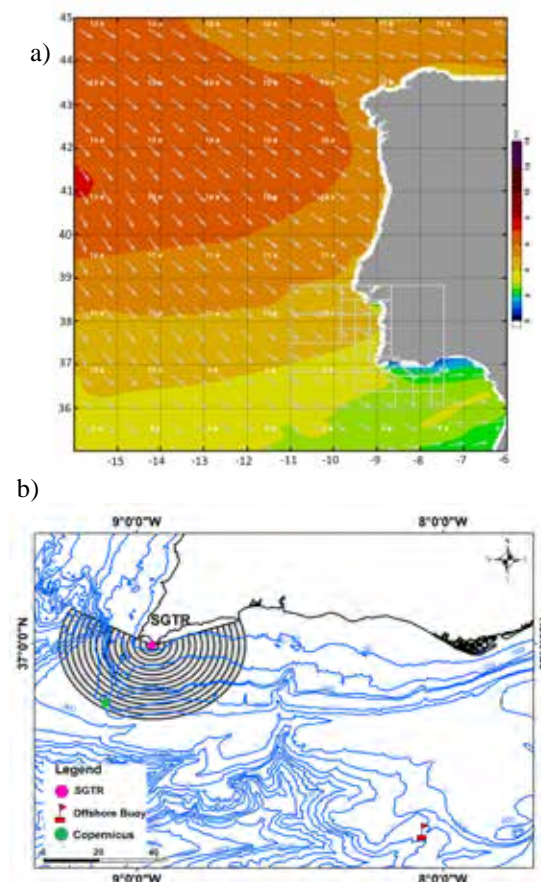


Fig. 1. a) Daily averaged significant wave height ( $H_s$ ) predicted in the Atlantic regional domain (10 December 2017); b) General area of study with High-Frequency (HF) radar coverage area (SGTR), where arcs are shown emerging concentrically from one radar site. Locations of the offshore and coastal buoys and local point of Copernicus model data.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.2. In Situ Observations

The coverage area of the Algarve HFR system includes a multiparametric buoy deployed four years ago in the southern waters of the Iberian Peninsula, operated by Hydrographic Institute. It is moored on the edge of the continental shelf: offshore buoy (36.39° N, 8.06° W; 75 km from shore; 1300 m depth). Hourly-averaged quality-controlled measurements of spectrally significant wave height ( $H_s$ ), the wave period at spectral peak (or peak period,  $T_p$ ), and the mean wave direction ( $W_{dir}$ ) were provided by the Fugro Wavesense Inertial sensor.

### 2.3. HF Radar (HFR)

HFR technology is based on measurements of the radio wave backscattered signal from ocean surface gravity waves in the 13 MHz range of the electromagnetic spectrum (Crombie, 1995).

Consistent estimations of the surface current field can be derived from the strong signal produced by the resonant first-order Bragg waves, whereas wave parameters can be extracted from the weaker second-order sea-echo Doppler echo spectrum using methods of integral inversion (Lipa *et al.*, 2005). There is a minimum sensitivity threshold for sea states below which the lower-energy second-order spectrum is closer to the floor noise and more likely to be contaminated (Lipa *et al.*, 2005). There is also a limiting factor for the HFR during extreme weather events as the wave height increases and exceeds the saturation limit defined (on an inverse proportion) by the radar transmit frequency. If the radar spectrum saturates, the first-order spectra merge with the second-order and interpretation of the spectra becomes impossible with existing methods.

The CODAR SeaSonde coastal 13 MHz HFR system used in this work was deployed in Algarve, more precisely Sagres (SGTR) in 2015, and has been operated by Hydrographic Institute. This system provides 10-min wave data that are subsequently subsampled at 60 min intervals to provide consistency in the temporal resolution of the data for validation and analysis. HFR data were retrieved from 15 individual range cells (RCs) from SGTR (Figure 1b), from cell 1 to cell 15 (1.8 and 27.8 km from site origin, respectively). The outermost HFR radar RC (cell 10-15) were selected to perform the comparison against the offshore buoy and Copernicus model.

### 2.4. Copernicus wave model

On July 18th, 2017, the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) released the first real-time global wave product based on satellite data (source: <http://marine.copernicus.eu/new-satellite-based-wave-product-released/>). It came after the launch last April (2017) of the wave product based on models, and is part of a series of releases listed in the WAVE

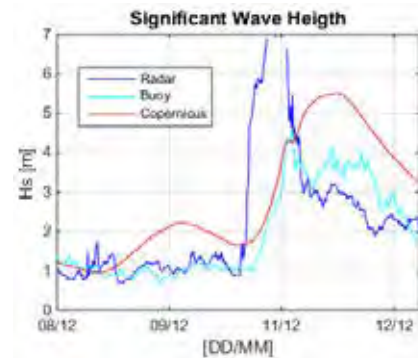
product roadmap. This new product from satellite altimeter data contains the **Significant Wave Height (SWH)** from Jason-3 and Sentinel-3A satellite altimeter data, provided within 3 hours after data acquisition with 7 km resolution. Monitoring Service (CMEMS), provides a 5-day regional wave forecast, which is updated twice a day.

## 3. RESULTS

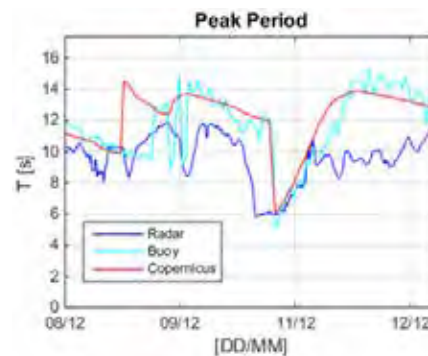
### 3.1. Preliminary HF Radar Wave Height Estimations

Previous comparisons against moored buoys have clearly proven the positive contribution of HF system radar to give reliable directional wave information (Atan *et al.*, 2015 and Long *et al.*, 2011). In this context, a preliminary assessment of southwestern Algarve HFR-derived wave data has been conducted for winter 2017/2018, when a number of extreme wave height events ( $H_s$  above 3 m) took place. HF radar appears to properly capture the main peaks of  $H_s$  and the minimal spatial variation between both sites, although, HF radar estimations seem to slightly overestimate  $H_s$  field in the Algarve region. Since these results are in line with previous literature on HFR-buoy wave height comparisons (Lipa *et al.*, 2014), we can state that HFR performance is consistent and it can act as a useful auxiliary tool, especially when no *in situ* wave observations are available. In this context, were analyzed extreme events like Ana (Figure 2a, 2b and 2c) and Emma (2d, 2e and 2f) storms.

a)



b)





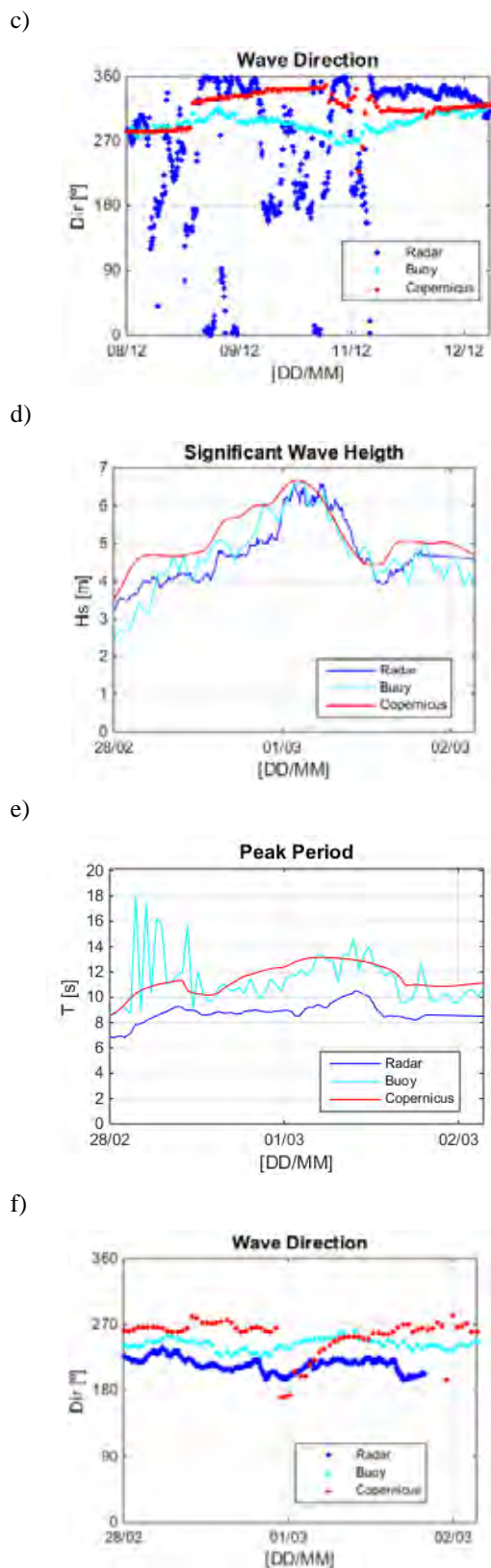


Fig. 2. Comparison of high-frequency radar (HFR)-derived significant wave height (a, d), peak period (b, e) and wave direction (c, f) against in situ observation (wave buoy) and Copernicus model for two selected wintertime periods (a, b, c – 09-13/12/2017) and (d, e, f - 28/02/2018 – 02/03/2018).

Table 1. Summary of statistical parameters (Root Mean Square – RMS and Correlation Index – CI) derived from the intercomparison of high-frequency radar (HFR) wave height (Hs), period (Tp) and wave direction (Dir) against in situ buoy and Copernicus model for the two selected wintertime periods (09/12/2017 – 13/12/2017 and 28/02/2018 – 02/03/2018).

08 December - 13 December			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (deg)
RMS	1.26	2.99	25.65
CI	0.54	0.35	-0.18
Availability SGTR (%)	95.70	95.70	95.70
Availability Buoy (%)	100.00	100.00	100.00

08 December - 13 December			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (deg)
RMS	1.69	3.10	5.53
CI	0.47	0.29	-0.16
Availability SGTR (%)	95.70	95.70	95.70
Availability Copernicus (%)	100.00	100.00	100.00

28 February - 02 March			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (deg)
RMS	0.58	3.56	27.74
CI	0.84	0.30	0.57
Availability SGTR (%)	91.118	91.118	91.118
Availability Buoy (%)	100.00	100.00	100.00

28 February - 02 March			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (deg)
RMS	0.68	0.89	18.42
CI	0.80	0.78	0.40
Availability SGTR (%)	94.118	94.118	94.118
Availability Copernicus (%)	100.00	100.00	100.00

### 3.2. Analysis of Extreme Wave Height Events in Algarve (2017–2018)

Intercomparisons have been conducted for the two selected periods, by using *in situ* measurements, remote-sensed estimations, and modeled data (Copernicus) in the closest grid point (Figure 1a). As it can be seen, for Ana storm event, there is a significant difference among the three data sources.

This statement is supported by the metrics gathered in Table 1, with RMS (Root Mean Square) and CI (Correlation Index) values for Hs in the ranges of 1.26 m (radar - buoy) and 1.69 m (radar - Copernicus) and CI 0.54–0.47 m, respectively. The main peaks are fairly well captured reaching the ~4.5m in the buoy and 7 m in the radar, although some of the most extreme wave height events are fairly captured by the Copernicus model as shown in Figure 2a. For Tp, during Ana storm event, the values decrease from ~12s to ~6s. This parameter is seen by the three sources although with some time delay (figure 2b) also marked by the RMS values in Table 1. The wave direction parameter reveals itself quite consistent

between the buoy and model while between radar and the buoy this parameter is instable during the storm recovering its stability afterwards.

Considering Emma storm, there is a significant resemblance among the three data sources. This statement is supported by the figure 2d, 2e, 2f and the statistics in Table 1, with RMS and CI values for Hs in the ranges of 0.58 m (between radar and buoy) and 0.68 m (between radar and Copernicus model) and CI 0.84–0.80 m, respectively. The Tp is very consistent in its behavior although it presents low CI values between radar and buoy (0.30 s) and higher CI values between model and buoy (0.78 s). For wave direction the behavior is better performed between radar and buoy (0.57° deg) than between Copernicus and buoy (0.40° deg).

#### 4. DISCUSSION

According to the proposed observations model approach, extreme wave height events in Algarve (when Hs exceeds 3 m) can be associated either with high or low peak periods. The prevailing incoming wave direction is from the WSW sector (Figure 2c and 2f) associated with high peak periods that lie typically in the range of 10–12 s while in other cases low peak periods derive either from changes in the wind direction or increasing wind velocity. HFR has been proven to be a valid instrument to efficiently monitor the wave field in the Algarve region, with metrics (CI above 0.80 m) in accordance with those reported by Long *et al.*, (2011). However, HF radar seems to slightly overestimate waves of higher amplitude as seen in Figure 2a but not in Figure 2d.

This is especially true for low sea states when the strength of the second-order spectra is very weak and therefore such contributions to the spectrum would have a more relevant impact. Also, the presence of bi-modal seas are expected to induce overestimation on HF radar significant height.

#### 5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The characterization of the most extreme wintertime wave height events in Algarve have been conducted using every 10 minute data of robust HFR-derived wave parameters, *in situ* buoy data and Copernicus model. Equally, Copernicus model performance was rather consistent despite underestimating the most extreme wave height events. The HFR system has demonstrated to be a good remote sensing tool to retrieve wave information in coastal areas, although a slight overestimation was detected in Hs measurements. Overall, these results prove that an observational and modeling approach can provide a comprehensive characterization of severe wave conditions in coastal areas and show benefit from the complementary nature of both systems.

Since *in situ* devices present some instrumental limitations and HFR is constrained to exclusively overlook coastal areas, the coordinated use of

Copernicus model and wave buoy can provide detailed wave information for specific severe weather episodes. Finally, there are currently some ongoing actions focused on the analyses of bi-modal seas, where different swell seas associated with different wind and wave conditions can interfere in the performance of HF radar measurements.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank the Interreg Atlantic Area project MyCOAST, (EAPA 285/2016) co-funded by the ERDF (EU).

#### REFERENCES

- Atan, R.; Goggins, J.; Harnett, M.; Nash, S.; Agostinho, P. (2015). Assessment of extreme wave height events in Galway Bay using High Frequency radar (CODAR) data. *In Renewable Energies Offshore*; CRC Press: B. Raton, FL, USA, pp. 49–56.
- Atan, R.; Goggins, J.; Harnett, M.; Agostinho, P.; Nash, S. (2016). Assessment of wave characteristics and resource variability at a 1/4-scale wave energy test site in Galway Bay using waverider and high frequency radar (CODAR) data. *Ocean Eng.*, 117, 272–291.
- Semiring, L.; Van Ormondt, M.; Van Dongeren, A.; Roelvink, D. (2015). A validation of an operational wave and surge prediction system for the Dutch coast. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 1231/42.
- Bell, R.J.; Gray, S.L.; Jones, O.P. (2017). North Atlantic storm driving of extreme wave heights in the North Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 3253–3268.
- Carracedo, G.P.; Balseiro, C.F.; Penabad, E.; Gómez, B.; Pérez-Muñuzuri, V. (2005). One Year Validation of Wave Forecasting at Galician Coast. *J. Atmos. Ocean Sci.* 10, 407–419.
- Crombie, D.D. (1995). Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*, 175, 681–682.
- Liberato, M. L. R. (2014). The 19 January 2013 windstorm over the N. Atlantic: large-scale dynamics and impacts on Iberia. *Weather and Climate Extremes* doi: 10.1016/j.wace.2014.06.002.
- Lipa, B.J.; Nyden, B. (2005). Directional wave information from the SeaSonde. *IEEE J. Ocean. Eng.* 30, 221–231.
- Lipa, B.; Barrick, D.; Alonso-Martirena, A.; Fernandes, M.; Ferrer, M.; Nyden, B. Brahan (2014). project high frequency radar ocean measurements: currents, winds, waves and their interactions. *Remote Sens.* 6, 12094–12117.
- Long, R.M.; Barrick, D.; Largier, J.L.; Garfield, N. (2011). Wave observations from Central California: SeaSonde Systems and *in situ* wave measurements. *J. Sens.* 1–18.

## Renaturalização da Zona do Lugar de Baixo, Madeira

João Castro (1), Ana Mendonça (2), Conceição J.E.M. Fortes (2)

- (1) SOS – Salvem o Surf, [jnnmc@hotmail.com](mailto:jnnmc@hotmail.com)  
 (2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**Resumo:** O presente trabalho descreve a aplicação do modelo numérico COULWAVE ao estudo da propagação de ondas na zona da Praia do Lugar de Baixo, Madeira, com vista a simular as características hidrodinâmicas na zona de estudo permitindo analisar as alturas de ondas, zona de rebentação e reflexão da onda junto à costa. O objetivo final é propor soluções para a renaturalização desta zona e o melhoramento das condições de surf.

**Palavras-chave:** Surf, Madeira, COULWAVE, rebentação, reflexão

### 1. INTRODUÇÃO

O surf em Portugal é uma atividade com grande potencial de crescimento tanto a nível económico direto ou indireto. Assim, e dado o crescente número de praticantes, a procura de locais para a prática desse desporto tem vindo a ser cada vez maior. Esta tendência também se verifica na ilha da Madeira e nesse sentido, a zona da praia do Lugar de Baixo, a oeste do Funchal, tem potencial para ser um desses locais, Fig. 1 e Fig. 2.

Na zona da praia do Lugar de Baixo existem vários restaurantes, um centro de interpretação ambiental e uma pequena lagoa sem ligação ao mar. Foi construído um talude de proteção da lagoa, entre o lado oeste da lagoa do Lugar de Baixo e a rampa de acesso à água, situada a leste dos restaurantes.

A onda do Lugar de Baixo, originalmente tubular e das únicas da ilha adequadas para principiantes, sofreu alterações provocadas pela construção do talude de enrocamento, devido à reflexão da onda no mesmo. Com efeito, o declive acentuado do talude leva à rebentação abrupta sobre o mesmo, o que põe em causa a segurança do surfista. Além disso promove a reflexão da onda alterando a qualidade da onda (Save the Waves, 2018).



Fig 1. Ilha da Madeira (Fonte: Google Maps, 2016).

No presente trabalho apresenta-se o estudo realizado com o modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2002) para caracterizar as condições hidrodinâmicas na zona do Lugar de Baixo.

Nesse sentido, pretende-se estabelecer um conjunto de linhas de intervenção de modo a tornar esta zona melhor e mais segura para a prática do surf. É, pois, necessário caracterizar a situação atual, ao nível da

agitação marítima na zona e das características da rebentação e propor e estudar novas soluções para o fim em vista. Estas soluções podem incluir a alteração do declive do talude de proteção da lagoa, a construção de um recife artificial, e a remoção do material existente no fundo do talude proveniente da destruição da marina, sem que se altere o substrato marinho dessa zona.

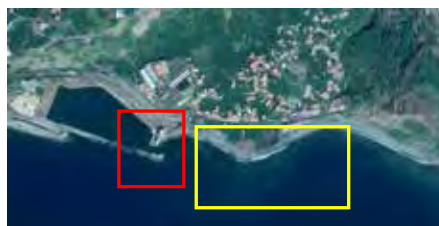


Fig 2. Linha de costa recente Lugar de Baixo (amarelo); Destruição da Marina do Lugar de Baixo (vermelho) (Fonte: Google Maps, 2016).

### 2. MODELO COULWAVE

O código COULWAVE, Lynett e Liu (2002), é uma implementação do modelo de propagação de ondas baseado nas equações de Boussinesq expandidas, deduzidas por Wei *et al.* (1995). As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e quantidade de movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*). Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades. Com estes perfis de velocidade, que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzido um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas intermédias e apresentar características lineares até um número de onda de  $kh \sim 8$ , e um comportamento não linear de 2ª ordem até  $kh \sim 6$ .

Lynett e Liu (2002) introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade, dependentes do tempo, para ter em conta variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

O modelo é assim aplicável desde águas intermédias até à rebentação. Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser corretamente simuladas pelo modelo.

Para as fronteiras exteriores são aplicados dois tipos de condições: de reflexão total e de radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de Wei e Kirby (1995), enquanto que para a condição de radiação ou condição de fronteira aberta é usado um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), de acordo com Kirby *et al.* (1998).

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu (2002) e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre, velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador e zonas de rebentação.

### 3. CASO DE ESTUDO

A praia do Lugar de Baixo (Fig 3) situa-se na costa sul da Madeira, no concelho e freguesia da Ponta do Sol, Portugal, a 24 km Oeste do Funchal. É nesta praia que se encontra a onda surfável mais próxima do Funchal, tubular e acessível para vários níveis de surf.

Como referido, foi construído um talude de proteção da lagoa, entre o lado oeste da lagoa do Lugar de Baixo e a rampa de acesso à água, situada a leste dos restaurantes.



Fig 3. Vista aérea do talude e lagoa do Lugar de Baixo, Madeira (fonte: Save the Waves)

Ora, a lagoa do Lugar de Baixo, antes da obra do talude de proteção, possuía características naturais únicas em toda a ilha pelo aproveitamento que dela faziam muitas espécies de aves migratórias. Era a única lagoa de maré existente no arquipélago da Madeira, e por isso apresentava uma riqueza e biodiversidade muito particulares.

Depois da construção do talude, a lagoa deixou de ter ligação ao mar, perdendo a sua função original e “limpeza” natural. Assim sendo, por constituir um espaço de relevante interesse ornitológico, considera-se importante a recuperação da Lagoa e consecutiva despoluição, Fig 4.

Esta zona apresenta alguns problemas para a prática do surf. Com efeito, esta prática é limitada para alturas significativas de onda superiores a 1.5 m, uma vez que abaixo deste valor a rebentação dá-se sobre o talude, e, para  $H_s > 1.5$  m é necessário uma grande destreza do surfista devido à proximidade da rebentação ao talude.



Fig 4. Poluição na lagoa do Lugar de Baixo

A dimensão e a qualidade da onda são também prejudicadas, devido ao fenómeno de reflexão consequência do acentuado declive desse talude (Fig 5). Mais ainda, verifica-se que existem diversos materiais que se encontram depositados na base do talude, proveniente da ruína do quebra-mar da marina do Lugar de Baixo, que mais uma vez põe em causa a segurança do surfista (observação no local e informação fornecida pelos locais).

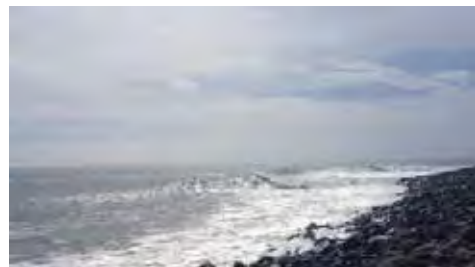


Fig 5. Reflexão da onda junto ao talude, Lugar de Baixo, Madeira

### 4. APLICAÇÃO NUMÉRICA

O estudo de modelação numérica foi desenvolvido de modo a simular as características hidrodinâmicas na zona de estudo permitindo analisar com detalhe as alturas de onda, zona de rebentação e reflexão da onda induzida pelo talude.

Nas secções seguintes apresentam-se as condições de aplicação do modelo COULWAVE.

#### 4.1 Batimetria e condições de agitação incidente

A batimetria da zona em estudo foi obtida através de levantamentos topo-hidrográficos de abril de 2003 e março de 2012 da Sociedade de Desenvolvimento da Ponta Oeste, S.S. e do Instituto Hidrográfico, respetivamente.

Neste estudo considerou-se necessário caracterizar os regimes gerais de agitação marítima na zona do Lugar de Baixo, utilizando o modelo numérico SWAN (Booij *et al.* 2006). As etapas foram, assim:

- A caracterização dos regimes de agitação marítima na boia do Funchal;
- A transferência das características das ondas da boia do Funchal para a zona próxima da praia do Lugar de Baixo;
- A caracterização dos regimes de agitação marítima na fronteira barlamar da malha utilizada para o modelo COULWAVE.

Com base nesse regime selecionaram-se um conjunto de ondas para testes com o modelo COULWAVE. Testaram-se assim três alturas de onda, quatro períodos de onda e a direção de propagação de  $190^\circ$ , descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de  $H_s$  (m),  $T$ (s) e  $L$ (m) testados no COULWAVE

$H_s$	$T$ (s)	10	11.775	13	18
1 m,					
2 m,	$L$ (m)	104	125	140	199
3 m					

#### 4.3 Domínio computacional e parâmetros do modelo numérico

No código COULWAVE é gerada uma malha computacional regular com base num número mínimo de pontos por comprimento de onda, fornecido pelo utilizador e definido consoante o período, de forma a ser obtida uma malha com um espaçamento constante. Com base em estudos anteriores (Mendonça *et al*, 2010), foi considerado um mínimo de 40 pontos por comprimento de onda, um número de Courant de 0.01 e foram simuladas cerca de 100 ondas. O domínio de cálculo obtido tem 548.5 m na direção  $x$  e 699 m na direção  $y$  e um espaçamento constante,  $\Delta x = \Delta y = 3.125$  m (Fig 6).

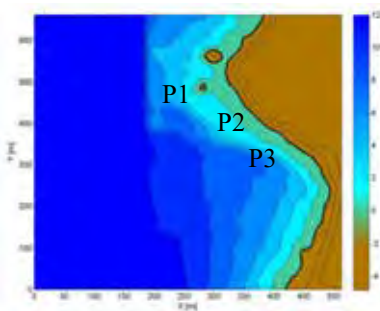


Fig 6. Domínio de cálculo e batimetria

Foi adicionado ao domínio uma zona de profundidade constante na qual se efetua a geração da onda através do método da função fonte, Wei *et al*. (1999). A sua localização foi alvo de testes preliminares, tendo sido posicionada em  $x=170$  m, para uma correta propagação e desenvolvimento da onda. Foram impostas as condições de agitação de ondas regulares sinusoidais indicadas na Tabela 1.

Nas extremidades laterais (barlamar e sotamar) do domínio de cálculo, foram usadas condições de fronteira de absorção com o objetivo de absorver a energia das ondas que atingem estas regiões. Nas restantes fronteiras consideraram-se condições de

fronteira de reflexão total. A dimensão das fronteiras de absorção é de um comprimento de onda.

Verifica-se que o parâmetro do atrito de fundo ( $ks$ ) afeta a estabilidade do modelo tendo sido utilizados valores entre 0.01 m e 0.001 m. Para a viscosidade turbulenta utilizou-se um valor de 0.2.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos foram obtidos para todos os nós da malha de cálculo em termos de elevação da superfície livre.

A zona de rebentação foi obtida através da aplicação da fórmula de Sverdrup e Munk (1946), que relaciona a altura significativa da onda com a profundidade, considerando-se a ocorrência de rebentação para valores superiores a 0.8.

A reflexão da onda é analisada em três pontos considerados mais relevantes para o estudo (i) rocha (P1): o local de início da onda para os surfistas, com  $y = 502$  m; (ii) Meio do talude (P2): local intermédio na linha de rebentação para os surfistas,  $y = 430$  m; e (iii) Café (P3): está suscetível ao galgamento, em  $y = 370$  m.

Na Fig 7 e na Fig 8 observa-se que, para  $H_s=1$  m, a linha de rebentação da onda ocorre muito próximo do talude ou sobre o talude aumentando o perigo para o surfista em caso de queda, devido à profundidade ser muito reduzida sob a onda.

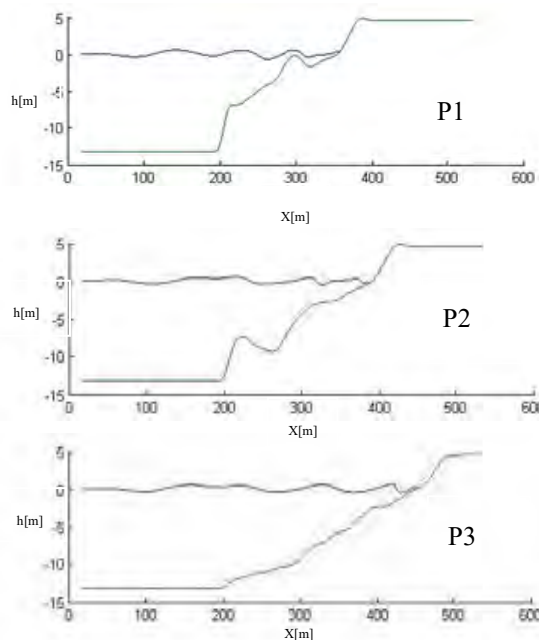


Fig 7. Perfil transversal da onda nos pontos P1 a P3, para  $H_s=1$  m e  $L=125$  m

Segundo os surfistas locais, para ondas com altura significativa desta ordem de grandeza, este é o principal problema induzido pela declividade do talude.

Na Fig 9 e na Fig 10 observa-se que com o aumento da altura de onda ( $H_s=3$  m) a sua surfabilidade terá tendência a aumentar também, já que a posição da

linha de rebentação se encontra mais afastada da costa, sendo também menos perigosa para o surfista em termos de profundidade existente sob a onda. O tipo de rebentação da onda pode, no entanto, ser afetado pela reflexão e consequente *backwash* energético no talude.

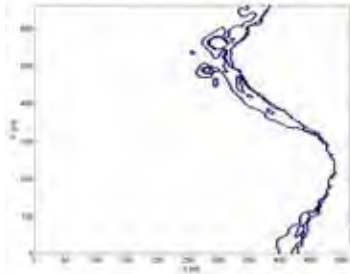


Fig 8. Zona de rebentação para  $H_s=1$  m e  $L=125$  m (azul) e linha da costa (preto)

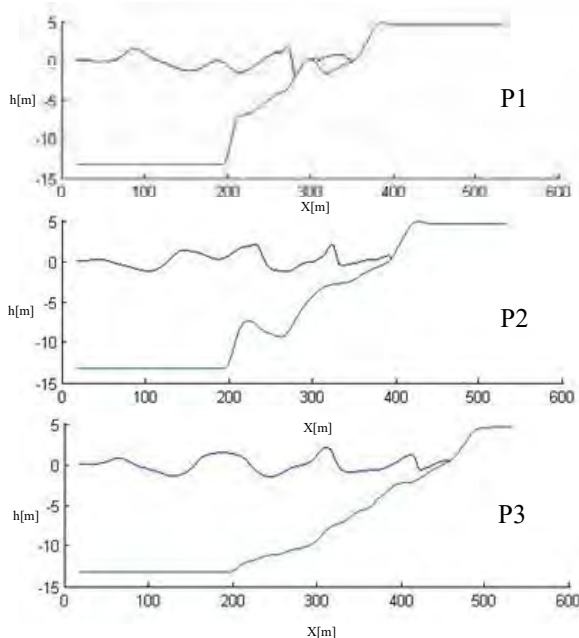


Fig 9. Perfil transversal nos pontos P1 a P3 para  $H_s=3$  m e  $L=125$  m

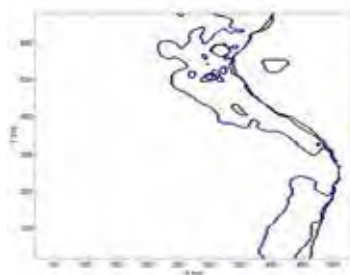


Fig 10. Zona de rebentação para  $H_s=3$  m e  $L=125$  m (azul) e linha da costa (preto).

## 6. TRABALHO EM DESENVOLVIMENTO

No presente projeto pretende-se analisar detalhadamente o processo de reflexão induzido pelo talude, de modo a verificar a qualidade da onda para o surfista, no ângulo e tipo de rebentação. Simultaneamente, pretende-se também verificar a

perigosidade das ondas relacionada com a posição da linha de rebentação. Nesse sentido, procurar-se-á estabelecer um conjunto de linhas de intervenção de modo a tornar esta zona melhor e mais segura para a prática do surf. A futura configuração a propor terá como principais objetivos a diminuição da reflexão da onda (diminuição do declive do talude) e a limpeza natural da Lagoa, dessa forma será apresentada, para breve, a solução mais adequada sempre com a proteção dos edifícios existentes em vista.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de Renaturalização de Surf Spots Danificados, apoiado e financiado pela SOS – Salvem o Surf.

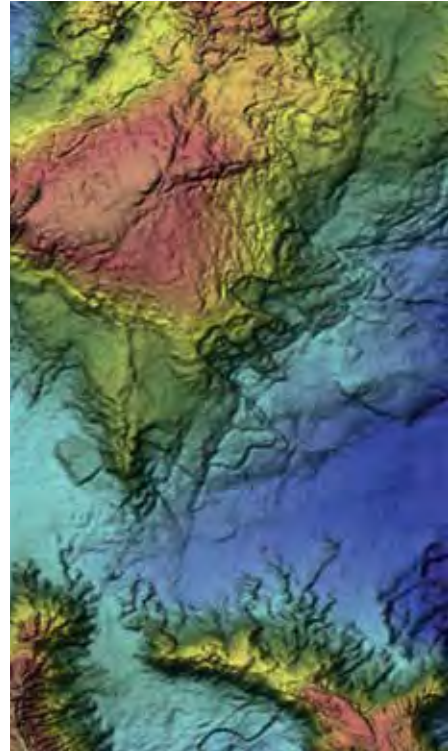
## REFERÊNCIAS

- Booij, N., Haagsma, I.J.G., Holthuijsen, L.H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R.C., Van der Westhuysen, A.J., Zijlema, M. (2006). “SWAN Technical Documentation, Cycle III, version 40.51”. Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Kirby, J.M., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B., Dalrymple, R.A. (1998). “Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model, Documentation and User’s Manual”. CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Dep. Civil Eng., Univ. Delaware, Newark.
- Lynett, P.J. and Liu, P. L.-F. (2004). “Modelling wave generation, evolution and interaction with depth – Integrated Dispersive wave equations – COULWAVE Code Manual”, Cornell University Long. Inter. Wave Modelling Package.
- Mendonça, A., Fortes, C.J., Capitão, R., Neves, M.G., Moura, T. e Antunes do Carmo, J.S. (2012). “Wave hydrodynamics around a multi-functional artificial reef at Leirosa”. *Journal of Coastal Conservation* vol. 16, Issue 4, 543–553.
- Save the Waves Coalition, Non-Profit Org. (2018). <https://www.savethewaves.org/programs/endangered-waves/endangered-waves-past-sites/lugar-de-baixo-madeira/>. Acesso em: 17 de maio 2018.
- Sverdrup, H.U. and Munk, W.H. (1946). “Theoretical and empirical relations in forecasting breakers and surf”, *Eos Trans. AGU*, 27(6), 828–836.
- Wei, G. and Kirby, J.T. (1995). “A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations”. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 120, pp. 251 - 261
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T. and Subramanya, R. (1995). “A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves”. *Journal of Fluid Mechanics* 294, pp.71 - 92.
- Wei, G., Kirby, J.T., Sinha, A. (1999). “Generation of waves in Boussinesq models using a source function method”. *Coastal Eng.*, 36:271–299.



# OCEANOGRAFIA GEOLÓGICA

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA







## Variabilidade textural e composicional das partículas em suspensão durante um ciclo de maré - Estuário do Tejo

R. Santos (1,2), A.I. Santos (1,3) e A. Oliveira (1)

- (1) Instituto Hidrográfico- Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa. E-mail: [ritaguerrasantos93@gmail.com](mailto:ritaguerrasantos93@gmail.com)  
 (2) FCUL - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal  
 (3) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

**Resumo:** Este trabalho pretende perceber a variabilidade textural e composicional das partículas em suspensão, durante um ciclo de maré no estuário do Tejo. Em novembro de 2015, no âmbito do projeto SEDEX 2015, com um caudal  $< 315 \text{ m}^3/\text{s}$ , foram obtidos parâmetros físicos e sedimentológicos, através de métodos diretos (colheita de água) e indiretos (LISST, ADCP, RCM9). A concentração de partículas foi relacionada com a turbidez e a direção/velocidade/magnitude da corrente. A turbidez revelou-se um excelente indicador da concentração das partículas em suspensão junto ao fundo, traduzida pela equação:  $y = 0,008x$ . Observou-se que as partículas em suspensão são maioritariamente filossilicatos (ilite e caulinite) e tectossilicatos (quartzo e feldspato potássico), com dimensões que variam entre 64 e 179  $\mu\text{m}$  (meio da coluna de água) e, entre os 84-183  $\mu\text{m}$  (junto ao fundo). Constatou-se ainda que, a coluna de água se encontrava estratificada, existindo evidências de um transporte de partículas de montante.

**Palavras-chave:** Ciclo de Maré, Estuário do Tejo, concentração, turbidez, partículas em suspensão.

### 1. INTRODUÇÃO

O estuário do Tejo, localizado na costa Ocidental portuguesa, apresenta uma dinâmica sedimentar bastante complexa, que proporciona a mistura de sedimentos com diferentes origens, marinhos e fluviais. Esta mistura de sedimentos resulta das variações de maré e do fluxo do caudal do rio Tejo (Oliveira, 1967), que atualmente é a maior fonte de material em suspensão que atinge o estuário. De acordo com Vale & Sundby (1987) a descarga anual média de sólidos em suspensão é de  $400 \times 10^6 \text{ kg/ano}$ . Esta carga de matéria particulada em suspensão depende do caudal do rio, das condições da maré (enchente ou vazante, marés vivas ou marés mortas) e da sua capacidade de remobilização do sedimento de fundo, com consequências nos valores da turbidez. Assim, os valores máximos de turbidez, superior a 50 mg/l, ocorrem em períodos de marés vivas (Vale & Sundby, 1987), normalmente associados a locais onde existe ressuspensão. Com este estudo pretendeu-se caracterizar a variabilidade textural, concentração e composição das partículas em suspensão durante um ciclo de maré semi-diurna (cerca de 10h) e perceber a sua relação com as condições forçadores presentes no momento da amostragem.

### 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A campanha SEDEX 2015 foi realizada em novembro de 2015 a bordo do navio NRP Andrómeda. Este estudo baseia-se nos dados colhidos no dia 12 de novembro numa estação fixa (Fig. 1.) durante aproximadamente um ciclo de maré semi-diurna (10 horas). A estação fixa, estava

localizada perto da confluência da ribeira do Jamor (perto da Cruz Quebrada) com o baixo estuário do rio Tejo.

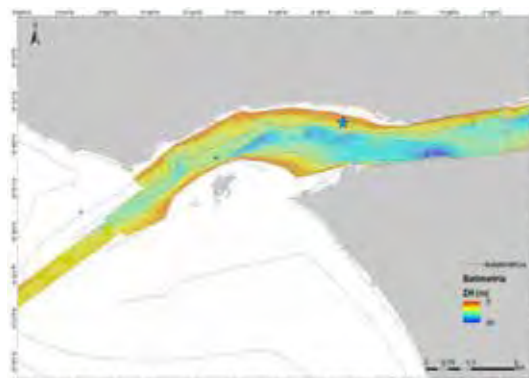


Fig. 1. Mapa batimétrico de 2015 (IH) com a localização da estação fixa (símbolo da estrela em azul) onde se realizou a amostragem a bordo do navio Andrómeda, perto da ribeira do Jamor (Cruz Quebrada).

Neste estudo foram utilizados métodos diretos (colheita de água com um contentor de 10L) e métodos indiretos (ADCP 300, LISST-ST, RCM9) para a análise da coluna de água. A água colhida à superfície (- 1m) foi filtrada a bordo utilizando filtros de celulose (0,45  $\mu\text{m}$  de porosidade e 47 mm de diâmetro). Com os filtros obtidos foi determinada a concentração (g/l) e a mineralogia das partículas em suspensão por difração de raios-X.

Com recurso ao equipamento LISST-100 obteve-se dados sobre a temperatura, profundidade e concentração/dimensão das partículas em suspensão em dois níveis da coluna de água: (i) a meio da coluna de água (entre 5m a 7m de profundidade);

(ii) junto ao fundo (entre 11m e 13m de profundidade). O perfilador acústico ADCP 600 kHz fundeado 10 dias antes da realização da estação fixa forneceu dados de corrente com intervalo temporal de 300s e ao longo da coluna de água em camadas verticais (*bins*) de 50 cm, a partir da profundidade de 1.61 m acima do fundo até à superfície. Para este estudo foram selecionados os *bins* correspondentes aos três níveis da coluna de água em análise.

O correntómetro acústico RCM9 foi colocado na mesma estrutura de fundeamento do ADCP 600, a 0,75 m do fundo fornecendo dados pontuais de salinidade, temperatura, velocidade da corrente e turbidez. Os dados obtidos através dos métodos indiretos acima referidos foram analisados recorrendo ao software *Grapher* 9. Para informações mais detalhadas sobre os métodos utilizados consultar Santos *et al.*, (2016).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caudal médio do rio Tejo

Durante a amostragem a amplitude da maré variou entre 0,88 - 3,69 m no Porto de Lisboa (IH, tabelas de previsão de marés, 2015), correspondendo a um período de transição de marés mortas para marés vivas.

Em novembro de 2015, o escoamento médio diário medido na estação hidrológica de Almourol (SNIRH, 2018) foi de 192,05 m<sup>3</sup>/s. Na Fig.2 observa-se que no mês de novembro, o valor máximo de escoamento foi atingido no ano de 1997 (1819,11 m<sup>3</sup>/s) e o valor mínimo em 1992 (30,61 m<sup>3</sup>/s), e uma média de 315 m<sup>3</sup>/s. Comparando com o valor médio, o mês de novembro de 2015 apresentou baixos caudais tal como os 3 anos antecedentes.

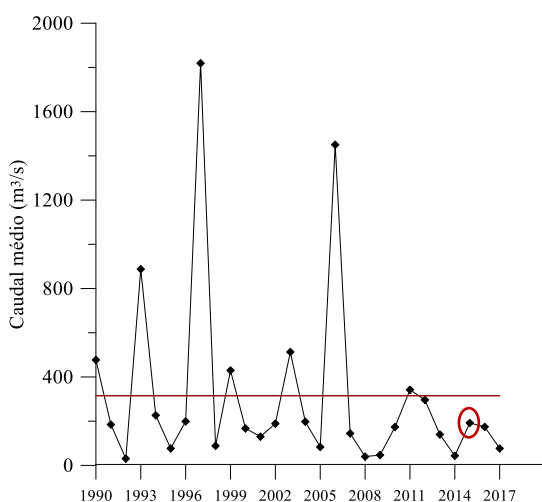


Fig. 2. Variação do caudal médio no mês de novembro entre 1990 e 2017, o valor médio do caudal (linha a cheio vermelha) e círculo a vermelho o ano de amostragem.

#### 3.2. Correntes, Concentração, Dimensão e Mineralogia das Partículas em Suspensão

A turbidez obtida com o RCM9, revelou-se um excelente indicador da concentração das partículas em suspensão obtida com o LISST (Fig. 3), tendo sido possível determinar a seguinte equação:  $y = 0,008x$ .

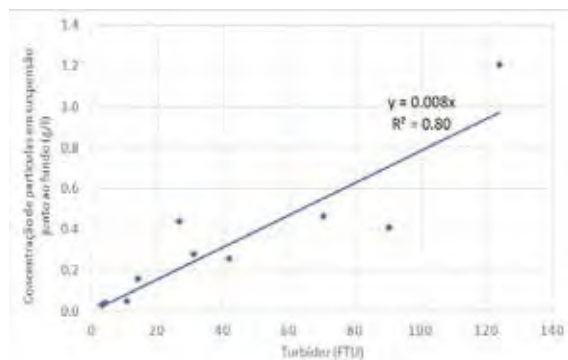


Fig. 3. Variação da turbidez (FTU) vs. Concentração de partículas junto ao fundo.

Na Tabela 1, apresentam-se os resultados obtidos agrupados por níveis (-1m, -5m e - 11m) de forma a mostrar a sua variação e inter-relação ao longo do ciclo de maré em estudo. Como esperado, observou-se que a corrente média é superior à superfície do que junto ao fundo durante todo o ciclo de maré, com valor máximo de 0,87 m/s, em enchente. Contudo os valores máximos da corrente são detetados na fase de vazante, a meio da coluna de água (0,90 m/s) e à superfície (1,09 m/s), devido ao facto de os períodos de vazante serem persistentemente mais curtos que os períodos de enchente, conforme referido por Freire, P (1999).

Quanto à concentração de partículas verifica-se que aumenta da superfície para junto ao fundo, sendo necessário referir que os valores no fundo (0,75 m) foram calculados através da correlação com a turbidez acima descrita (Fig.2). Neste caso tanto o valor máximo como o valor médio mais elevado foram detetados na fase de vazante.

Com os dados acima descritos e tendo em consideração a Fig. 4, observou-se um desfaseamento entre a concentração máxima de partículas e os máximos de corrente, nomeadamente, a magnitude da corrente. O facto de o valor máximo da corrente ter sido detetado uma hora antes do valor máximo da concentração de partículas em suspensão sugere que neste local estaríamos a colher partículas em suspensão transportadas de um ponto mais a montante.

O D50 máximo (188µm) foi atingido na estufa da maré, a meio da coluna de água, coincidindo com a diminuição da corrente o que poderá corresponder a uma possível agregação/floculação das partículas originalmente de granulometria mais fina, em

situação de estofa. Esta explicação é apoiada pela mineralogia das partículas em suspensão formada maioritariamente por filossilicatos (ilite, caulinite, clorite), tectossilicatos (feldspato potássico, plagioclase e quartzo) e, em menores percentagens calcite (Tabela 1). A percentagem de filossilicatos tendeu a diminuir da vazante para enchente, contrariamente aos tectossilicatos que aumentam

ligeiramente. Na fase de enchente parece haver uma predominância dos filossilicatos, partículas mais finas e com forma planar com uma tendência para a formação de flocos que posteriormente se depositam no fundo (Trento, 2005). Na fase de vazante regista-se um aumento de tectossilicatos, provavelmente de origem “fluvial” transportado de montante.

		Corrente (m/s) - ADCP			Concentração de partículas (g/l) - LISST			D50 - $\mu\text{m}$ (LISST)			Mineralogia (% dos filtros)		
		min	máx	média	min	máx	média	min	máx	média	Filossilicatos	Tectossilicatos	Carbonatos
											média		
Enchente	à superfície	0,53	0,87	0,72	0,0049	0,0051	0,005	x	x	x	88	10	2
	meio da coluna de água	0,58	0,81	0,73	0,04	0,10	0,06	66	126	87	x	x	x
	junto ao fundo	0,47	0,66	0,58	0,05	0,46	0,31	84	104	92	x	x	x
	no fundo (RCM9 - 0,75 m)	0,21	0,39	0,33	0,08	0,72	0,46	x	x	x	x	x	x
Estofa	à superfície	0,41	0,62	0,51	0,0049	0,0110	0,008	x	x	x	84	9	7
	meio da coluna de água	0,37	0,48	0,43	0,03	0,05	0,04	118	188	118	x	x	x
	junto ao fundo	0,30	0,33	0,31	0,03	0,04	0,04	107	134	121	x	x	x
	no fundo (RCM9 - 0,75 m)	0,15	0,17	0,16	0,02	0,03	0,03	x	x	x	x	x	x
Vazante	à superfície	0,52	1,09	0,61	0,0128	0,0342	0,018	x	x	x	73	21	5
	meio da coluna de água	0,20	0,90	0,49	0,11	0,52	0,26	64	179	108	x	x	x
	junto ao fundo	0,08	0,66	0,33	0,16	1,20	0,47	84	183	134	x	x	x
	no fundo (RCM9 - 0,75 m)	0,13	0,43	0,25	0,11	0,99	0,38	x	x	x	x	x	x

Tabela 1. Variação da corrente, da concentração de partículas, do D50 e da mineralogia durante o ciclo de maré em estudo. x - sem valores.

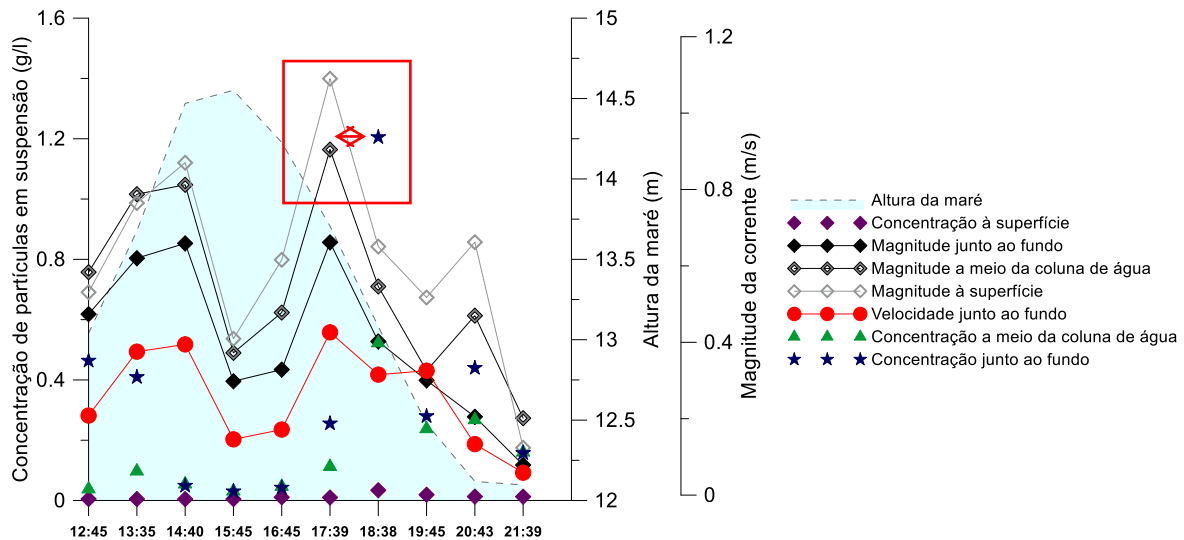


Fig.4. Variação da concentração de partículas em suspensão na coluna de água (representada pelos vários símbolos), da magnitude da corrente (representada pelas 3 linhas a cheio cinzentas e a preto) e da velocidade da corrente (linha a cheio vermelha) durante o ciclo de maré. Na caixa vermelha e com a seta vermelha está representada a área onde se observa o desfasamento entre a magnitude e a concentração das partículas em suspensão.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho confirmou-se que a turbidez é um excelente indicador da concentração das partículas em suspensão.

Durante as várias fases da maré foi possível observar a oscilação esperada dos vários parâmetros medidos, porém, foi na fase de vazante que se detetaram os valores máximos da corrente e da concentração de partículas em suspensão, havendo evidências de que as partículas em suspensão foram transportadas de um local a montante da área em estudo durante a vazante. Este facto será provavelmente consequência de os períodos de vazante serem persistentemente mais curtos que os períodos de enchente no estuário do Tejo. Na estofa da maré, encontraram-se

partículas com valores mais elevados de D50, sugerindo a existência de agregação/floculação de partículas com granulometria originalmente mais fina, visto que composicionalmente eram constituídas maioritariamente por filossilicatos.

#### Agradecimentos

Este trabalho apenas foi possível devido ao projeto SEDEX 2015 desenvolvido pelo Instituto Hidrográfico. Agradece-se à tripulação da marinha que esteve a bordo do NRP Andrómeda e permitiu que estes dados fossem colhidos.

#### REFERÊNCIAS

Freire, P (1999). *Evolução Morfo-sedimentar de margens estuarinas (Estuário do Tejo, Portugal)*.

Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Oliveira, R. (1967). Contribuição para o estuário do Tejo. Sedimentologia. *Memória LNEC* n°296. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. 61.

Santos, A.I.; Oliveira, A.; Moreira, S. (2016). *Cross-calibration of suspended sediment sensors and samples at a fixed station in the Tejo estuary* (SEDEX 2015). *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Instituto Hidrográfico, Lisboa 21-23 junho, 2016, 233-236.

Snirh, 2018 - <http://snirh.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.2>

Trento, A. (2005). *Dinâmica da flocculação no transporte de sedimentos finos*. Tese para obtenção de grau de doutor em Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Vale, C. & Sundby, B. (1987). Suspended Sediment Fluctuations in the Tagus Estuary on Semi-diurnal and Fortnightly Time Scales. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25, 495-508.

## Análise das mudanças geomorfológicas na cabeceira do canhão submarino de Monterey, Califórnia, entre 2002 e 2015

R. da Silveira Moraes (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Marinha. E-mail: [renatodsmoraes@gmail.com](mailto:renatodsmoraes@gmail.com)

**Resumo:** O canhão submarino de Monterey possui um comportamento ativo e é de grande importância para a dinâmica da célula litoral local. Periodicamente, acumulações de sedimento no interior da cabeceira do canhão colapsam e causam deslizamentos submarinos e correntes de turbidez, ocasionando episódios de deposição e erosão. Identificar os locais onde ocorrem estes episódios, assim como quantificar a frequência e intensidade do transporte sedimentar, é essencial para se entender a dinâmica do canhão e no processo de tomada de decisões por parte de autoridades governamentais. Modelos digitais de elevação da cabeceira do canhão referentes ao período entre os anos de 2002 e 2015, provenientes de levantamentos batimétricos multifeixe, realizados pelo Seafloor Mapping Laboratory (*California State University, Monterey Bay*), foram utilizados para efetuar análises espaciais tridimensionais com auxílio de um sistema de informações geográficas (*ArcGIS*) com o intuito de avaliar, identificar e quantificar as mudanças geomorfológicas que ocorreram durante esse período

**Palavras-chave:** Batimetria Multifeixe, Balanço Sedimentar, Análise Espacial

### 1. INTRODUÇÃO

O canhão submarino de Monterey é de grande importância para a dinâmica da célula litoral local. Os sedimentos da região são continuamente transportados a partir de vários processos costeiros, principalmente eventos extremos de ondas e tempestades, descargas fluviais e correntes de deriva litoral. Esses processos resultam em remobilização significativa de sedimentos que, por sua vez, podem causar processos de deposição e erosão.

Estima-se que aproximadamente 300 mil a 400 mil metros cúbicos de sedimento são capturados e acumulados anualmente no interior da cabeceira do canhão submarino (Best e Griggs, 1991). Periodicamente essas acumulações de sedimento podem colapsar e causar deslizamentos submarinos ou correntes de turbidez, similares aos deslizamentos que ocorrem no ambiente terrestre (Smith, 2005). A frequência e características desse tipo de evento ainda não são bem conhecidas e necessitam ser melhor estudadas. Tal conhecimento é essencial para auxiliar na gestão costeira e no processo de tomada de decisões por parte das autoridades responsáveis.

O presente estudo tem como objetivo analisar diversos modelos digitais de elevação, produzidos através de batimetria multifeixe, que representam o relevo do canhão submarino, referentes a uma série temporal com treze anos de duração (2002 a 2015) para verificar e quantificar as mudanças geomorfológicas que ocorreram no local neste período.

### 2. ÁREA DE ESTUDO

A baía de Monterey está localizada no litoral central do Estado da Califórnia, Estados Unidos da América, a aproximadamente 100 km ao sul de São Francisco.

A baía possui uma estreita e rasa plataforma continental que é cortada e dividida pelo canhão submarino de Monterey, o mais proeminente de vários canhões encontrados por toda a costa do Estado da Califórnia. Ele é o maior e mais profundo canhão submarino da costa oeste do continente americano. O canhão estende-se até aproximadamente 90 km em direção ao mar a partir do município de Moss Landing, e atinge profundidades que ultrapassam os 3 mil metros, fazendo parte de um sistema complexo que possui diversos tributários.

Mais especificamente, a área estudada nesse trabalho possui extensão aproximada de 3,5 km de comprimento por 1 km de largura e profundidade variando de 8 a 222 metros. Esse trecho está localizado próximo à linha de costa e ao porto do município de Moss Landing (Fig. 1).

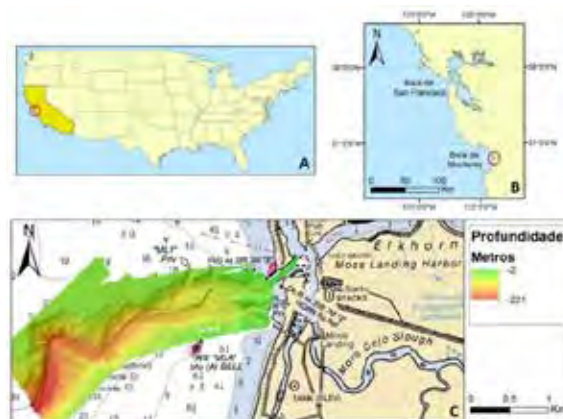


Fig. 1. A) Mapa dos Estados Unidos da América, B) Mapa do litoral central da Califórnia, C) Modelo digital de elevação da área de estudo sobreposto à carta náutica da região.

### 3. MÉTODOS

#### 3.1. Aquisição de dados

A partir da biblioteca de dados do *Seafloor Mapping Laboratory - California State University Monterey Bay* (<http://seafloor.otterlabs.org/>), foram selecionados modelos digitais de elevação da cabeceira do canhão, no formato *ArcGRID* com resolução espacial de 3 metros, referentes aos anos de: 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013 e 2015. Os dados encontram-se no datum horizontal WGS 84 e datum vertical NADV 88.

Os levantamentos hidrográficos foram realizados pela embarcação de pesquisas oceanográficas e hidrográficas *VanTresca*, propriedade da *California State University Monterey Bay* (Fig. 2).



Fig. 2. Imagem do interior da embarcação de pesquisa *VanTresca*.

#### 3.2 Variação da posição das margens na cabeceira

Utilizando o software *ArcGIS* foi possível gerar linhas de contorno referentes à posição das margens da cabeceira do canhão para cada um dos anos analisados. As linhas foram utilizadas para verificar o comportamento das margens da cabeceira do canhão ao longo dos anos, especialmente da porção mais próxima aos molhes do porto de Moss Landing: se estão avançando em direção à linha de costa, recuando ou se estão sofrendo variações erráticas. Para análise da variação da posição das margens foi utilizada a extensão do *ArcGIS*, *DSAS - Digital Shoreline Analysis System* desenvolvida pelo USGS - *United States Geological Survey* em parceria com o instituto de pesquisas *Woods Hole Science Center*.

#### 3.3. Volume e área

A ferramenta *Spatial Analyst* do software *ArcGIS* foi utilizada para calcular o volume e a área da cabeceira do canhão para cada ano por métodos distintos a partir da análise dos modelos digitais de elevação

Com os respetivos valores da área e volume calculados para cada ano, foi possível calcular a variação média de área e de volume entre os intervalos analisados, a variação média total que ocorreu entre 2002 e 2015 e também a variação média anual.

#### 3.4. Erosão e deposição

A partir do uso da ferramenta *Raster Calculator* foram executados diversos cálculos com os modelos digitais de elevação como objetivo de identificar as principais áreas do canhão que vêm sofrendo processos de erosão e de deposição.

Diferenças menores que  $\pm 1$  metro não foram consideradas na análise por não serem significativas e estarem dentro do valor de incerteza inerente ao processo de aquisição de dados.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1. Variação da posição das margens na cabeceira

Os resultados obtidos indicam que uma parcela significativa do setor norte da cabeceira avançou em direção à linha de costa entre 2002 e 2015 (Fig. 3). As maiores variações ocorreram na parte localizada entre os transectos 66 e 84, com avanço total próximo aos 100 metros (Fig. 4) e taxas de avanço anual entre 5 e 7 metros (Fig. 5).

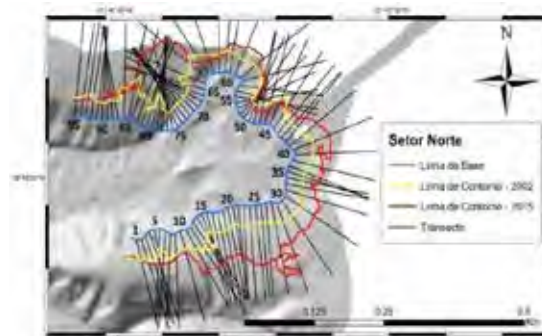


Fig 3. Detalhe do setor norte. Houve avanço significativo das margens no período compreendido entre 2002 e 2015



Fig 4. Variação total (metros) da posição das margens entre 2002 e 2015 no setor norte.

As margens do setor norte da cabeceira do canhão encontram-se a menos de 100 metros de distância dos molhes do canal de entrada do Porto de Moss Landing (Fig. 6). O avanço contínuo da cabeceira do canhão em direção à linha de costa e consequentemente ao porto, representa um risco em potencial, deixando o mesmo em estado de vulnerabilidade (Wong, 2006).



Fig. 5. Taxa de variação (metros/ano) na posição das margens entre 2002 e 2015 no setor norte.

#### 4.2. Volume e área

A cabeceira do canhão apresentou um comportamento variado com 4 períodos em que a área diminuiu e outros 4 em que aumentou. O volume também apresentou essa oscilação, aumentando em 5 intervalos e diminuindo nos outros 3. As tabelas 1 e 2 mostram os valores calculados por cada método para cada período analisado.

Tabela I. Variação na área entre cada ano ( $m^2$ )

Período	Método Utilizado				
	Polígono	Pixels x 9	Área Superficial	Média	Desvio Padrão
2002 - 2003	-1.953,00	-5.445,00	-2.245,00	-3.214,33	1.937,32
2003 - 2005	7.053,00	7.865,00	7.110,00	7.342,67	453,25
2005 - 2006	21.215,00	21.429,00	25.731,00	22.791,67	2.547,79
2006 - 2007	-10.397,00	-11.808,00	-13.734,00	-11.979,67	1.675,11
2007 - 2008	-9.472,00	-9.360,00	-8.001,00	-8.944,33	818,87
2008 - 2009	1.948,00	-2.961,00	-3.942,00	-1.651,67	3.155,76
2009 - 2013	9.154,00	14.571,00	14.004,00	12.576,33	2.977,36
2013 - 2015	-802,00	-5.827,00	-672,00	-2.433,67	2.939,43
2002 - 2015	16.746,00	7.664,00	18.251,00	14.220,33	5.727,60

Tabela II. Variação no volume entre cada ano ( $m^3$ )

Período	Método Utilizado				
	Corte/Preenchimento	Estatísticas Zonais	Volume Superficial	Média	Desvio Padrão
2002 - 2003	2.167.892,56	1.801.216,00	2.113.804,00	2.027.637,52	197.942,97
2003 - 2005	1.718.974,16	1.821.184,00	1.761.493,00	1.767.217,05	51.344,78
2005 - 2006	1.906.662,03	2.805.088,00	3.108.317,00	2.606.689,01	624.912,23
2006 - 2007	-1.225.363,48	-1.732.512,00	-1.882.685,00	-1.613.520,16	344.437,50
2007 - 2008	663.299,46	959.232,00	1.095.551,00	906.027,49	220.982,78
2008 - 2009	-476.838,41	-619.520,00	-799.653,00	-632.003,80	161.768,97
2009 - 2013	-248.948,46	-174.976,00	-117.903,00	-180.609,15	65.704,09
2013 - 2015	509.817,32	517.216,00	702.627,00	576.553,44	109.245,56
2002 - 2015	5.081.665,29	5.316.928,00	5.981.551,00	5.460.048,10	466.702,36

A área total calculada para o ano de 2002 foi de  $2.758.396,00 \pm 20.984,72 m^2$  e para o ano de 2015 foi de  $2.772.616,33 \pm 17.643,96 m^2$ . O volume total calculado para o ano de 2002 foi  $284.878.627,00 \pm 1.499.514,68 m^3$  e para 2015 foi  $290.527.866,50 \pm 1.029.555,25 m^3$ .

No geral, apesar da variação de comportamento, a cabeceira do canhão apresentou um aumento líquido médio na área de  $14.220,33 \pm 5.728,60 m^2$  entre 2002 e 2015, o que representa um aumento de  $0,52\% \pm 0,21\%$  na área total e corresponde a um aumento líquido médio anual de  $1.093,87 \pm 440,58 m^2$  (Fig. 6).

Em relação ao volume, novamente mesmo com a oscilação de comportamento, houve um aumento líquido médio de  $5.460.048,10 \pm 466.702,36 m^3$  entre 2002 e 2015. Esse valor representa um aumento de  $1,92\% \pm 0,16\%$  no volume total e um aumento líquido médio anual de  $420.003,70 \pm 35.900,18 m^3$  (Fig. 7).



Fig. 6. Valores da variação média da área e seus respectivos desvios padrões, na cabeceira do canhão, para cada intervalo de tempo analisado e a variação média anual.



Fig. 7. Variação média de volume e seus respectivos desvios padrões, na cabeceira do canhão, para cada intervalo de tempo analisado e a variação média anual.

Sandersfeld (2009) e Mcenery *et al.*, (2014) propuseram que o comportamento geomorfológico do canhão oscilou em torno de um equilíbrio dinâmico e, de fato, os resultados de variação na área e volume na cabeceira do Canhão Submarino de Monterey entre 2002 e 2015 apontam que, a curto prazo houve alternância entre intervalos temporais de aumento na área e volume, caracterizando a ocorrência de processos erosivos, com intervalos de redução na área e volume, indicando a ocorrência de processos deposicionais. Porém analisando a longo prazo, a cabeceira do canhão sofreu aumento líquido tanto na área quanto no volume, indicando no geral, uma dominância na incidência de episódios erosivos, o que já foi previamente documentado e sugerido por Smith *et al* (2005).

#### 4.3. Erosão e deposição

Os mapas gerados a partir da diferença entre os modelos digitais de elevação coincidiram com o padrão dos resultados obtidos nos cálculos de área e volume, reforçando a consistência dos resultados obtidos a partir dos métodos usados para efetuar os cálculos e corroborando a ideia de que o processo dominante no canhão atualmente é de aprofundamento e alargamento (Fig. 8).

A interpretação dos resultados evidenciou a natureza ativa do canhão submarino de Monterey a partir da existência de acumulações cíclicas de sedimento na região da cabeceira seguidas por eventuais colapsos do material depositado. Esse comportamento



coincide com a hipótese proposta por Okey (1997) de que existe um ciclo sazonal, onde há um acumular de sedimentos e detritos orgânicos na cabeceira do canhão durante os meses de verão, enquanto durante o inverno (estação de tempestades e agitação marítima mais intensa) a cabeceira experimenta eventos de descarga e transporte de sedimentos para as zonas mais profundas do canhão.

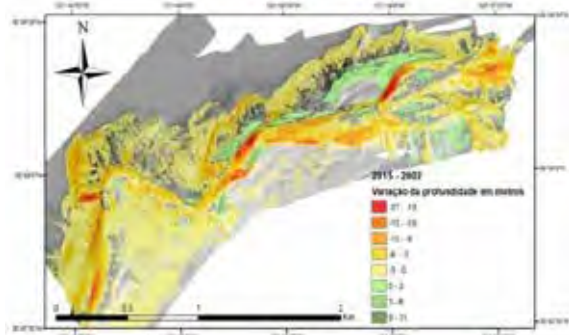


Fig 8. Variação de profundidade em metros que ocorreu na área de estudo entre toda série temporal, compreendida entre os anos de 2002 e 2015.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cabeceira do Canhão Submarino de Monterey sofreu aumento tanto na área quanto no volume durante o intervalo de tempo compreendido entre 2002 e 2015. O comportamento sedimentar observado sugere que, no geral e a longo prazo, os processos erosivos são dominantes corroborado com hipóteses sugeridas anteriormente por diversos investigadores.

Do ponto de vista prático, a pesquisa evidenciou a importância de realizar a monitorização regular de canhões submarinos ou outras morfologias submarinas, especialmente quando estas se encontram muito próximas da linha de costa, visando prever ameaças e riscos em potencial. Com isso é possível antecipar seus efeitos e implementar ações de mitigação em tempo.

### Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Jarbas Bonetti (UFSC) pela disponibilidade, apoio e confiança durante a graduação e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. RikkKviteke a equipado Seafloor Mapping Laboratory (CSUMB) pelos ensinamentos e por cederem os dados que tornaram a realização deste trabalho possível.

### REFERÊNCIAS

- Best T.C.; Griggs, G.B. (1991). A sediment budget for the Santa Cruz littoral cell, California. *Society for Sedimentary Geology Special Publication*, 46, 35-50.
- Mcenery, W.; Olejniczak, K.; Quackenbush, A.; Sadrpour, N.; Urness, J.; Kvitek, R. (2014). A 2014 assessment of geomorphic change in the Monterey Canyon using high-resolution

multibeam echosounder. 2014. *Marine Sciences*, California State University Monterey Bay, Seaside, 15 pp.

Okey, T.A. (1997). Sediment flushing observations, earthquake slumping, and benthic community changes in Monterey Bay Canyon head. *Continental Shelf Research*, 17, 877-897.

Sandersfeld, M. (2009). Detection of Geomorphic Change in the Monterey Submarine Canyon Head. *Marine Sciences*, California State University Monterey Bay, Seaside, 29 pp.

Smith, D.P.; Kvitek, R.; Iampietro, P.J.; Wong, K. (2005) Twenty-nine months of geomorphic change in upper Monterey Canyon (2002-2005). *Marine Geology*, 236, 79-94.

Wong, K. (2006) Mapping annual sediment change in the Monterey Canyon head using serial multibeam bathymetry surveys. *Marine Sciences*, California State University Monterey Bay, Seaside, 17 pp.

# Suspended sediments and water masses in the Madeira shelf

A. Oliveira (1), A. I. Santos (1,2), N. Zacarias (1) and L. Melo (1)

- (1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa; [anabela.oliveira@hidrografico.pt](mailto:anabela.oliveira@hidrografico.pt)  
 (2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

**Abstract:** In August 2017, an oceanographic survey was carried out in the Madeira Insular Shelf (Madeira Island, Portugal) aiming to identify sources of suspended materials (sediments and plankton), investigate possible gradients between inshore and offshore waters and finally understand the oceanographic phenomena that affect the transport and retention of particles (eddies, fronts, upwelling). Having these general objectives in consideration, this paper describes preliminary results of 46 CTD/fluorometry profiles and suspended particulate matter (SPM) samples collected during this survey, taking into account summer season dynamics, where intense upwelling events are expected.

**Key-words:** Madeira, islands, water masses, upwelling, CTD.

## 1. INTRODUCTION

Regarding local increase of productivity and chlorophyll maximums in the Madeira margin, the studies of Caldeira *et al.*, (2002) and Caldeira & Sangrà (2012) address the importance of the Ponta do Pargo (west) and Ponta de S. Lourenço (east) flanks of the Madeira island, due to their particular topographic and oceanographic features, such as wakes, eddies and upwelling.

As a result of a collaboration between Instituto Hidrográfico (IH) and Observatório Oceânico da Madeira (OOM), a CTD/ water sampling survey was conducted in the west and east flanks of the Madeira island in order to identify sources of suspended materials (sediments and plankton), investigate possible gradients between inshore and offshore waters and finally understand the oceanographic phenomena that affect the transport and retention of particles (eddies, fronts, upwelling). In this work, preliminary results of this survey are presented in

relation to suspended material (plankton and sediments) distribution.

Meteorological conditions in the Madeira Island are determined by the Azores subtropical high pressure system and the corresponding NE-trade winds. Generally, winds originate from the north to northeast and are stronger during late spring and early summer (Caldeira & Sangrà, 2012). Madeira Island is characterized by a high-energetic wave regime, with waves coming from west to northwestern direction, with mean heights between 2.5 and 5.0m (Rusu *et al.*, 2008; Rusu & Soares, 2012).

## 2. METHODS

31 CTD/fluorometry and water sampling profiles were carried out in the west (26 stations, 7 sections) and east (5 stations, 2 sections) flanks of the Madeira Island (fig.1), between the 3<sup>rd</sup> and the 4<sup>th</sup> of August 2017, on board NRP “Auriga”.

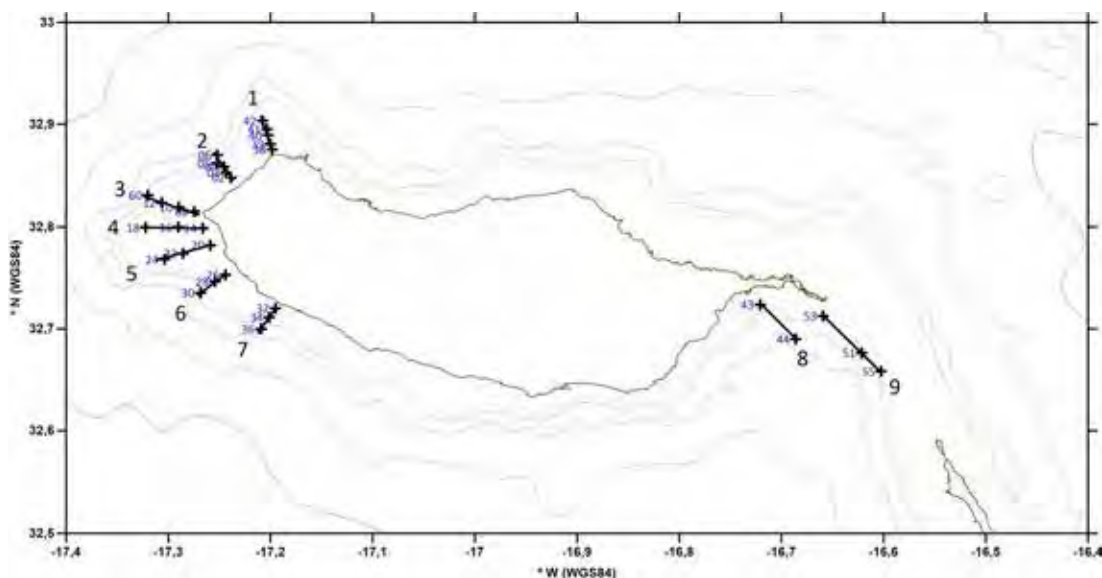


Fig.1. Cruise CTD stations (Coordinate System WGS84).

The CTD/fluorometry measurements extend from surface to the maximum depth of 500 m, using a CTD Seabird 19PLUS, with a Turner SCUFA fluorometer.

SBE Data Processing (v.7.26.7) software was used for CTD data processing and variable calculation (density, salinity, potential temperature). At each CTD station, water samples were collected near the surface (5m) using a pressure pump and filtered onboard. Five liters of seawater were filtered on acetate cellulose membranes (porosity 0.45µm, diameter 47mm), previously weighted to quantify particulate matter concentration (PMC).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The cruise was conducted from west to east, under well establish summer conditions with mean air temperatures of 24°C and strong winds from N-NNE (mean velocity 23-25 km/h; gust speed >40 km/h), increasing for the second day in the Ponta de S. Lourenço area). During the cruise the surface wave regime was weakly energetic with wave height <2m.

In Ponta do Pargo, a temperature north to south gradient was evident at surface levels (fig.2) with lower temperatures (<22.0°C) found near shore in sections 1 and 2 (north) and higher temperatures (>23.0°C) at section 7 (stations 30, 32 and 34). Surface temperatures in Ponta de S. Lourenço ranged between (22.5 and 23 °C). No significant gradient was found for salinity values which ranged between 36.7 and 36.8.

Density stratification was present in the water column, as expected under summer conditions. At least 3 marked thermocline/pycnoclines at ~10m, 25-30m and 50-75m depth were observed in almost all profiles (fig.3), which were more or less developed depending on the area and exposure to the dominant wind and waves. The surface pycnocline (~10m) is very well marked in the Ponta do Pargo density profiles (NW, W, SW in fig. 2 and 3) but almost absent offshore especially in Ponta de S. Lourenço (SE profiles), reflecting a larger mixing layer.

Fluorometry profiles (fig. 4), show *chlorophy a* maxima in Ponta de S. Lourenço; with the highest value observed in section 9 (station 55) with a value 3.04µg/l at 55m water depth. At Ponta do Pargo the *chlorophy a* maximum is deeper (78.5m) and with maximum value of 1.14µg/l at section 1 (station 42). Both are associated with the deeper, more stable, pycnocline (50-75m).

Unfortunately, the water sampling was only done at surface (5m), due to malfunction of IH CTD rosette system. So, at 5m depth, the mean PMC values were low (<1 mg/l) with values ranging between 0.2 and 2.2 mg/l. The maximum value (fig. 5) was found near coast at section 1 (north), associated with oceanic waters with relative low temperature

(<22.0°C) and also near the coast at Ponta de S. Lourenço. The fluorometry values ranged between 0.24 and 0.48 µg/l, and the higher values were found in Ponta de S. Lourenço (>0.35 µg/l), and also in section 1 (~0.30 µg/l).

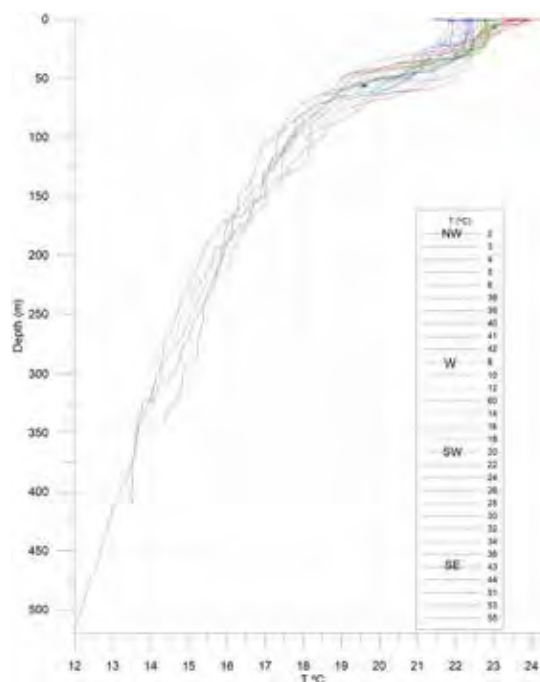


Fig. 2. Temperature profiles obtained in Madeira cruise 2017. NW- blue lines stations from sections 1 and 2; W- green lines, stations from sections 3 and 4; SW- red lines, stations from sections 5, 6 and 7; SE- black lines, stations from sections 8 and 9.

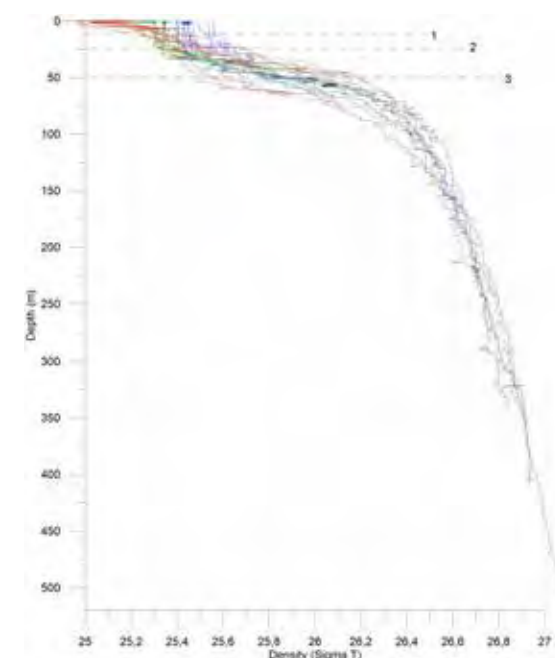


Fig. 3. Density profiles obtained in Madeira cruise 2017. NW- blue lines stations from sections 1 and 2; W- green lines, stations from sections 3 and 4; SW- red lines, stations from sections 5, 6 and 7; SE- black lines, stations from sections 8 and 9. Pycnoclines represented by dashed lines (1)-10m, (2)-25m; (3)-50m.

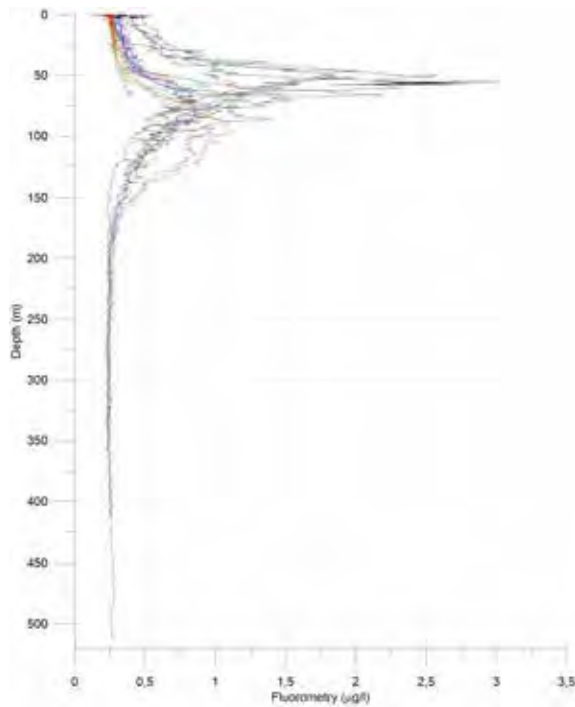


Fig. 4. Fluorometry profiles obtained in Madeira cruise 2017. NW- blue lines stations from sections 1 and 2; W- green lines, stations from sections 3 and 4; SW- red lines, stations from sections 5, 6 and 7; SE- black lines, stations from sections 8 and 9.

Direct observation of filtered samples (*not shown*) revealed that the majority of the particulate matter was plankton (and some microplastics), with no detectable terrigenous contribution, at least at 5m depth, corroborating the higher values of *chlorophyll a* detected by the fluorometer.

#### 4. FINAL CONSIDERATIONS

During the Madeira August 2017 summer cruise water stratification was observed with the detection of 3 pycnoclines, corresponding to different episodes of wave/wind mixing.

Fluorometry and implicit productivity distributions presented maximum *chlorophyll a* at 55m ( $3.0\mu/l$ ) in the east flank and a deeper three times lower maximum at 75 m in the western flank. Both maxima were related with the deeper identified pycnocline.

Near the surface (5m) the PMC values were low ( $<2$  mg/l), with plankton being the main contributor. Filters direct observation did not allow for the detection of any terrigenous particles, at this depth.

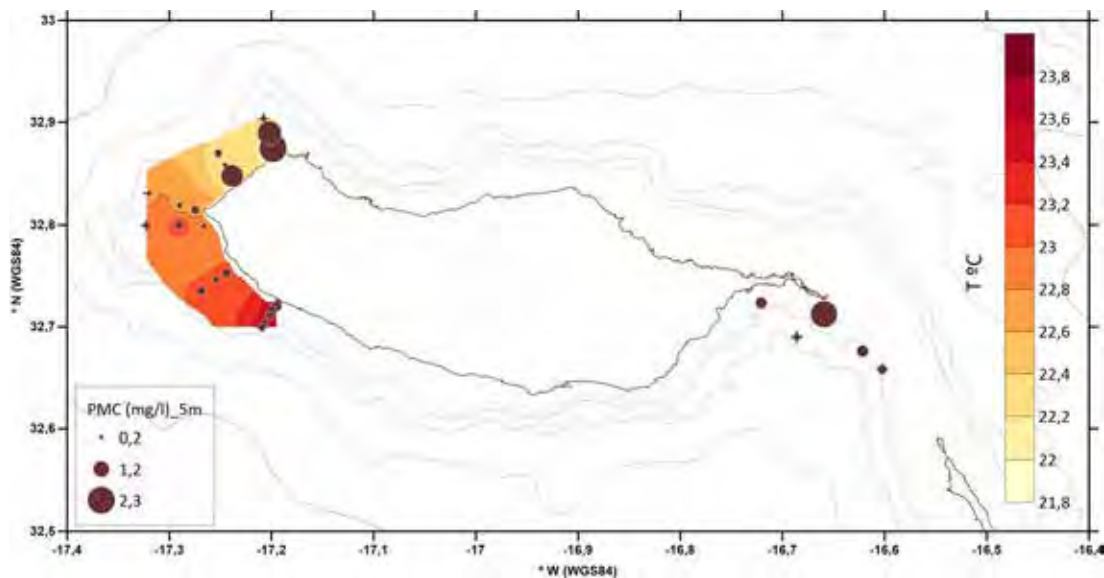


Fig. 5. PMC and temperature distribution for 5m depth.

#### Acknowledgments

The authors want to thanks the precious collaboration of the NRP “Auriga” crew, the “pirates” Nunes Santos and Adónis Barata, Teresa Silva and Áurea Narciso, in water sampling and filtering.

We also want to thank Rui Caldeira for the use of OOM CTD.

#### REFERENCES

- Caldeira, R.M.A., Groom, S., Miller, P., Pilgrim, D. and Nezlin, N.P. (2002). Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 80(2): 336-360.
- Caldeira, R.M.A. and Sangrà, P. (2012). Complex geophysical wake flows. *Ocean Dynamics*, 62(5): 683-700.

Rusu, E. and Guedes Soares, C. (2012). Wave energy pattern around the Madeira Islands. *Energy*, 45(1): 771-785.

Rusu, E., Pilar, P. and Guedes Soares, C. (2008). Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models. *Ocean Engineering*, 35(13): 1357-1371.

# Dinâmica sedimentar e evolução a longo prazo do porto da Praia, ilha de Santiago, Cabo Verde

L. I. Portela (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), lportela@lnec.pt

**Resumo:** Os processos de evolução costeira em Cabo Verde, resultantes de fatores naturais e de atividades humanas, são ainda pouco conhecidos. Analisa-se neste trabalho a evolução morfológica da baía do porto da Praia, na ilha de Santiago, com base em levantamentos hidrográficos de 1882 a 2016, fotografia aérea, imagens de satélite e cartografia histórica. Recorre-se também à modelação matemática de processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos, considerando a interação ondas-correntes, para interpretar as condições locais. Os elementos analisados sugerem uma tendência de acumulação sedimentar, com uma taxa média de avanço da praia, a longo prazo, da ordem de 1 m/ano. Estima-se que o caudal sólido transportado episodicamente pelas ribeiras afluentes seja uma fonte sedimentar importante. Embora a recente expansão do porto tenha diminuído a influência da ação das ondas, as condições mais favoráveis à remobilização e à circulação sedimentar no interior da baía permanecem associadas aos períodos de agitação marítima mais energética.

**Palavras-chave:** acreção, Cabo Verde, cartografia hidrográfica, modelação, morfodinâmica.

## 1. INTRODUÇÃO

O porto da Praia, na ilha de Santiago, é um dos principais portos de Cabo Verde. Situa-se numa baía limitada a W pelo promontório da ponta Temerosa e a E pela ponta das Bicudas. O centro histórico da cidade da Praia assenta num planalto, a N, e o ilhéu de Santa Maria ocupa parte da baía, a W.

O porto foi objeto de obras de ampliação em 2012-2013, que envolveram o prolongamento do molhe-cais em 230 m e a dragagem de uma bacia de manobra, com diâmetro de 400 m, a -13,5 m. O prolongamento do molhe-cais introduziu um novo confinamento da baía, a E.

Os sistemas costeiros insulares estão sujeitos a processos de evolução, dependentes de múltiplos fatores (Ramalho *et al.*, 2013).

O presente trabalho pretende contribuir para a análise da evolução da baía do porto da Praia. Para isso, combina duas abordagens: a comparação de cartas, levantamentos hidrográficos e imagens aéreas, visando a identificação de tendências de evolução; e a modelação numérica de processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos, com o objetivo de apoiar a identificação dos principais forçamentos e a explicação dessas tendências.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A baía da Praia é um ambiente microtidal. A maré é do tipo semidiurno, com amplitudes médias de 1,1 m em águas vivas e 0,5 m em águas mortas. O ZH situa-se 0,8 m abaixo do nível médio (IH, 2017).

Os ventos alísios, de NE, são predominantes, com a velocidade média do vento a variar entre 6,5 m/s em fevereiro e 3,5 m/s em agosto.

A corrente das Canárias, dirigida para SW, apresenta velocidades de 0,10-0,15 m/s (Zhou *et al.*, 2000), infletindo para W ao atingir a latitude de Cabo Verde (15°N).

A agitação marítima no exterior da baía tem uma altura significativa média de 0,6 m, podendo atingir 2,5 m. A maioria das ondas provém do sector 90°-112,5°, mas as alturas acima de 1,0 m estão associadas essencialmente ao sector 112,5°-180° (R. Capitão e J. Fortes, LNEC, com. pess.).

A ribeira da Trindade tem uma bacia hidrográfica de apenas 25 km<sup>2</sup>, mas está sujeita a episódios de cheia de ocorrência esporádica (Sabino *et al.*, 1999), com elevado transporte de caudal sólido.

O sedimento de fundo da baía apresenta diâmetros medianos entre 0,15 e 0,80 mm, com aparente preponderância da fração silto-argilosa na zona mais abrigada do porto (BCEOM, 2008).

A praia da Gamboa, no interior da baía, é arenosa. A praia Negra, na foz da ribeira da Trindade, mais exposta, é de cascalho. O ilhéu de Santa Maria e os restantes trechos costeiros são maioritariamente rochosos. Verifica-se uma crescente artificialização da orla costeira.

## 3. METODOLOGIA

Compararam-se cartas náuticas baseadas em levantamentos de 1882, 1902 e 1946, tendo também sido tida em conta cartografia mais antiga.

Como elementos mais recentes, foram analisados os levantamentos hidrográficos realizados pelo Instituto Hidrográfico em 2004 e 2016, no âmbito do acordo de cooperação entre Portugal e Cabo Verde no domínio da hidrografia e cartografia náutica.

Existindo fotografia aérea desde pelo menos 1957 (C. Mateus, ULisboa-IICT, com. pess.), procedeu-se à comparação de fotografia aérea de 1968 (CIGeoE) e imagens de satélite recentes.

Aplicou-se o sistema de modelação Delft3D (Deltares, 2014, 2015) para a simulação da hidrodinâmica, do transporte sedimentar e da evolução do fundo, por efeito da interação ondas-correntes. Definiu-se uma malha de cálculo principal com passo espacial de 20 m, cuja batimetria se baseia no levantamento de 2004 (incluindo, todavia, o prolongamento do molhe). As simulações foram realizadas considerando o efeito da maré, do vento (3,5-6,5 m/s de NE), do caudal fluvial (0-100 m<sup>3</sup>/s na ribeira da Trindade) e da agitação marítima (1,0-2,0 m de altura significativa, 8-12 s de período de pico e 90-180° de direção). Para o sedimento, foi considerado um  $D_{50}$  de 0,15 mm.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Evolução da baía

A comparação de cartas e levantamentos de 1882, 1946, 2004 e 2016, na área comum de  $1,1 \times 10^6$  m<sup>2</sup>, com cota média de cerca de -14 m, produziu resultados aparentemente consistentes com uma tendência de acreção moderada (ou de relativa estabilidade). Com efeito, obtiveram-se taxas de sedimentação de: 0,004 m/ano entre 1882 e 1946; 0,014 m/ano entre 1946 e 2004; e -0,012 m/ano entre 2004 e 2016, período durante o qual se verificou a dragagem da bacia de manobra.

Porém, a análise da distribuição espacial das áreas de deposição e de erosão (como a que se apresenta para o período de 70 anos entre 1946 e 2016 na Fig. 1, com um padrão irregular a profundidades apreciáveis) sugere que as taxas de sedimentação obtidas devem ser encaradas com reserva, o que se compreende, tendo em conta a evolução dos processos de aquisição de dados hidrográficos e a menor fiabilidade e densidade de sondagem dos levantamentos mais antigos.

A análise da batimétrica -6 m ZH, que limitará a faixa costeira mais ativa, revela um avanço de cerca de 80 m entre os dados mais antigos (1882 e 1946) e os mais recentes (2004 e 2016; Fig. 2). Este resultado sugere uma possível tendência de acreção frente à praia.

### 4.2. Evolução da praia

A incerteza associada à evolução da linha de costa é substancialmente menor.

A Fig. 3 apresenta duas imagens aéreas da praia da Gamboa, a sul da cidade alta, de 1968 e 2018, com identificação das linhas de costa (entendidas coincidentes com o limite da água). Neste período de 50 anos, verificou-se um avanço da linha de costa de cerca de 50 m (1 m/ano), estando atualmente toda a extensão da ponte-cais sobre praia emersa.

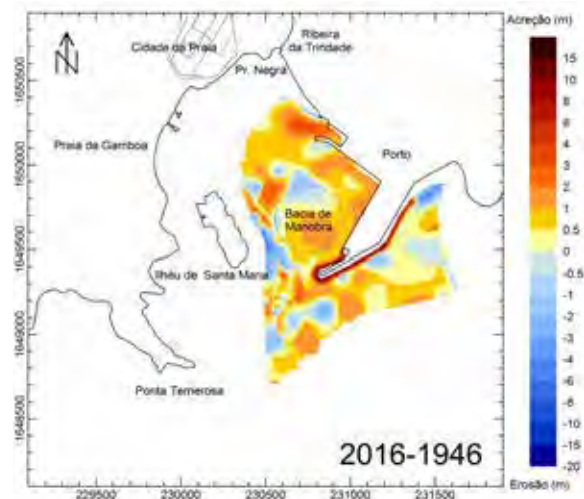


Fig. 1. Comparação de levantamentos hidrográficos: 2016-1946.



Fig. 2. Comparação da isolinha de batimetria -6 m ZH em levantamentos de 1882, 1946, 2004 e 2016.

Recorrendo a cartografia hidrográfica, é possível estimar a evolução ocorrida para períodos mais longos. Entre 1902 e 2018, estimou-se o avanço máximo em 110 m (Fig. 4), também próximo de uma taxa de evolução de 1 m/ano.

Note-se que diversas estruturas foram substituídas ou reconstituídas ao longo do tempo. Assim, por exemplo, a atual ponte-cais será mais longa do que a ponte-cais de madeira de 1880 (Infante D. Henrique), representada na carta de 1902. O cais próximo do quartel (cais de S. Januário) sofreu também alterações.

### 4.3. Modelação numérica

A Fig. 5 apresenta uma comparação de campos de velocidades obtidos na simulação de duas situações distintas: (a) sem agitação marítima; e (b) com agitação marítima de SE, com altura significativa de 1,5 m e período de pico de 12 s. Em ambos os casos, foi considerado também forçamento pela maré astronómica e pelo vento (3,5 m/s de NE), mas caudal fluvial nulo.



Fig. 3. Imagens aéreas da praia da Gamboa, a sul do centro histórico da cidade da Praia: **a** 1968 (fonte: CIGeoE); **b** 2018 (fonte: Google Earth). Linhas de costa a traço interrompido.



Fig. 4. Extrato de plano hidrográfico e imagem aérea da praia da Gamboa: **a** 1902 (fonte: Comissão de Cartografia, 1907); **b** 2018 (fonte: Google Earth). Linhas de costa a traço interrompido.

As simulações realizadas considerando apenas os efeitos da maré e do vento sugerem velocidades inferiores a 0,1 m/s no interior da baía e um pouco superiores em torno dos promontórios (velocidade máxima de 0,2 m/s; Fig. 5a).

As correntes obtidas para uma altura de onda significativa de 1,5 m de SE exibem velocidades de cerca de 0,3 m/s, atingindo 0,6 m/s nas áreas de menor profundidade junto do ilhéu de Santa Maria (velocidade máxima de 1,2 m/s; Fig. 5b). As simulações sugerem que a agitação gere na baía uma circulação de sentido horário. Porém, no sector norte da praia da Gamboa, a corrente poderá ser dirigida de NE para SW, o que estaria de acordo com a orientação da vala que nela desagua.

Simulações realizadas incluindo um caudal fluvial elevado indicam um efeito importante, mas, do ponto de vista hidrodinâmico, localizado na foz da ribeira da Trindade.

A simulação do transporte sedimentar indica que este depende essencialmente da ação das ondas, envolvendo áreas de reduzida profundidade. O transporte potencial é elevado na envolvente do ilhéu de Santa Maria e entre este ilhéu e a ponta Temerosa, mas a erosão prevista (Fig. 6) coincide com áreas onde a cobertura sedimentar é já praticamente nula.

## 5. DISCUSSÃO

A análise da evolução do porto da Praia, com base em levantamentos de 1882 a 2016, sugere uma tendência de acumulação sedimentar. Esta tendência está de acordo com referências anteriores (BCEOM, 2008). Porém, a incerteza associada ao exercício de comparação realizado é elevada. Mesmo entre os levantamentos de 2004 e 2016 ocorreram obras e uma operação de dragagem, que dificultam a análise das tendências de evolução.

Em contrapartida, a malha urbana da cidade alta encontra-se definida desde o último quartel do século XIX, constituindo uma excelente referência para a análise da evolução da praia.

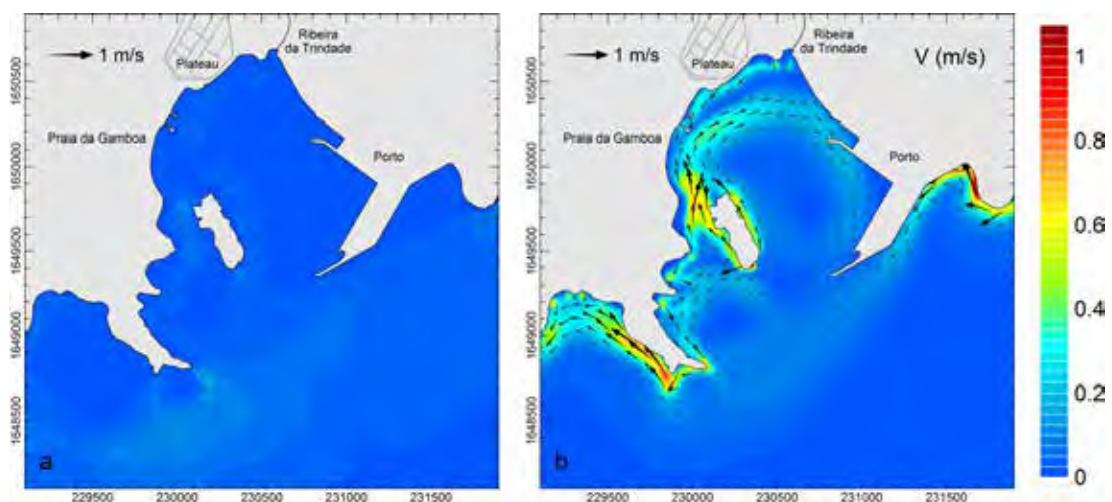


Fig. 5. Campo de velocidades no porto da Praia: **a** Simulação sem agitação marítima, com correntes devidas apenas ao vento (3,5 m/s de NE) e à maré astronómica; **b** Simulação com agitação marítima (altura de onda significativa de 1,5 m, período de pico de 12 s e direção de 135°), vento (3,5 m/s de NE) e maré astronómica.



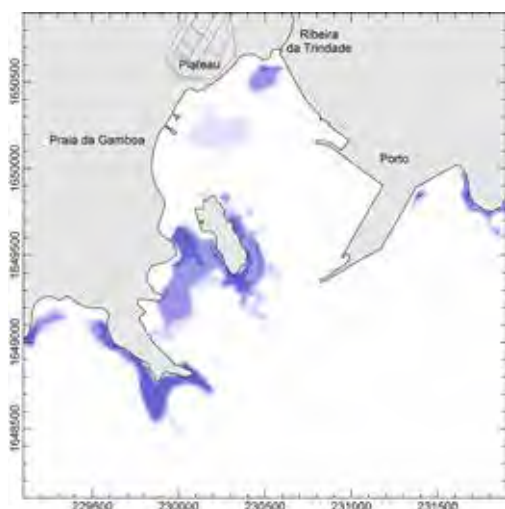


Fig. 6. Áreas de erosão potencial obtidas na simulação com agitação marítima (correspondente à Fig. 5b).

Parece legítimo admitir, a partir de cartografia histórica (por exemplo, de 1788 e ca. 1840), com maior subjetividade, que o avanço da praia observado dê continuidade a um processo que já estaria em curso anteriormente.

A modelação realizada apresenta limitações, decorrentes de alguma escassez de informação de base (por exemplo, medições de velocidades e cartas do sedimento superficial). Por conseguinte, os campos de velocidades calculados não foram objeto de verificação, devendo ser considerados meramente indicativos das condições locais e dos processos mais relevantes. Foi também admitida uma distribuição uniforme, não realista, da cobertura sedimentar do fundo.

Apesar disso, os resultados obtidos, ao indicarem que a agitação marítima será o principal agente mobilizador do sedimento na baía, e que terá também um papel preponderante nos padrões de circulação que se desenvolvem no seu interior, afiguram-se credíveis. Os resultados parecem igualmente suportar a hipótese de que a entrada de sedimento no sistema se faça principalmente através das ribeiras afluentes, em breves episódios de precipitação torrencial, e que parte desse sedimento encontre condições hidrodinâmicas que permitem a sua deposição no interior da baía.

## 6. CONCLUSÕES

A análise da evolução do porto da Praia, com base em levantamentos de 1882 a 2016, sugere uma tendência de acumulação sedimentar.

A análise da evolução da linha de costa no mesmo período, com base em cartografia e em imagens aéreas, revela uma taxa média de avanço da praia da Gamboa da ordem de 1 m/ano, consistente com essa tendência.

A entrada de sedimento no sistema verificar-se-á principalmente através das ribeiras afluentes, em particular da ribeira da Trindade e da própria vala existente na praia da Gamboa.

Estima-se que a agitação marítima, nos períodos de maior altura de onda de SE e S, seja o principal agente com capacidade para promover a circulação sedimentar no interior da baía. No entanto, parte significativa do material transportado pelas linhas de água durante as cheias encontrará condições que permitem a sua deposição no interior da baía.

A baía do porto da Praia atravessa um período de importantes transformações, marcado pela expansão do porto, concluída em 2013, bem como por outros desenvolvimentos, que poderão influenciar a sua evolução futura.

## Agradecimentos

O autor agradece ao Instituto Hidrográfico (IH) a disponibilização, para a realização deste trabalho, dos levantamentos mais recentes.

## REFERÊNCIAS

- BCEOM (2008). Second phase of the Port of Praia expansion and modernization project. Environmental impact assessment. Millennium Challenge Account, 559 pp.
- Deltares (2014). Delft3D-FLOW. Simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.34158. Deltares, Delft.
- Deltares (2015). Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual. Version 3.05.34160. Deltares, Delft.
- IH (2017). *Tabelas de Maré 2018, volume 2*. Marinha, Instituto Hidrográfico, Lisboa.
- Ramalho, R.S., Quartau, R., Trenhaile, A.S., Mitchell, N.C., Woodroffe, C.D., Ávila, S.P. (2013). Coastal evolution on volcanic oceanic islands: a complex interplay between volcanism, erosion, sedimentation, sea-level change and biogenic production. *Earth-Science Reviews*, 127, 140-170.
- Sabino, A.A., Querido, A.L., Sousa, M.I. (1999). Flood management in Cape Verde: the case study of Praia. *Urban Water*, 1, 161-166.
- Zhou, M., Paduan, J.D., Niiler, P.P. (2000). Surface currents in the Canary Basin from drifter observations. *Journal of Geophysical Research*, 105(C9), 21893-21911.

# Linha de costa: da detecção por imagens de satélite à modelação da evolução a longo prazo

S. Teixeira (1), F. Sancho (2), A. Trigo-Teixeira (3)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 LISBOA, Portugal.

[soraia.teixeira@tecnico.ulisboa.pt](mailto:soraia.teixeira@tecnico.ulisboa.pt)

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 LISBOA

(3) Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 LISBOA

**Resumo:** Este trabalho tem como principal objetivo verificar se diferentes linhas de costa iniciais, extraídas de imagens de satélite e de sensores, influenciam os resultados da modelação da sua evolução a longo prazo. Primeiramente, comparam-se as posições da linha de costa, em instantes próximos. Seguidamente, determina-se em que medida a ordem de grandeza da variação inicial observada influencia a evolução da linha de costa, usando o modelo numérico LITMOD. Verifica-se que as imagens de satélite mais indicadas para a extração da linha de costa são as obtidas pelos sensores NIR e RGB (satélite Sentinel2), concluindo-se que a morfologia da praia poderá influenciar a precisão da extração da linha de costa. Ao usar o modelo LITMOD constata-se que a importância dos desvios iniciais na posição da linha de costa se atenua com o tempo de simulação, embora haja um impacto significativo no cálculo de sedimentos acumulados.

**Palavras-chave:** Linha de costa, Imagens de Satélite, Modelo numérico de evolução da linha de costa.

## 1. INTRODUÇÃO

As imagens de satélite contribuem para o estudo da evolução da linha de costa. São utilizadas imagens de vários tipos de sensores, por exemplo sensores óticos e sensores SAR, disponibilizadas online e gratuitamente pelas agências espaciais. A grande cobertura espacial, as medições periódicas e o acesso a locais remotos constituem as principais vantagens do uso das imagens de satélite para detecção da linha de costa. Contudo, a resolução espacial nem sempre é adequada à detecção com precisão da linha de costa.

Neste artigo são analisados os efeitos da resolução espacial na detecção da linha de costa e na sua evolução a longo prazo, utilizando-se o modelo numérico LITMOD (Vicente, 1991). Trata-se de um modelo de linha que se baseia em dois pressupostos principais (Vicente e Clímaco, 2003):

- i. O perfil de praia não sofre alteração durante os processos de erosão e acreção. Os recuos e avanços da linha de costa são simulados através do movimento do perfil de praia paralelo a si mesmo (compreendido, entre a profundidade de fecho, e a altura da berma da praia).
- ii. O transporte sólido litoral longitudinal é o fator determinante na evolução do sistema costeiro.

Neste trabalho foram medidas as diferenças entre linhas de costa instantâneas, extraídas num local num certo instante, usando imagens de satélite com sensores e bandas e diversas. Foi utilizando o software ArcGis e a ferramenta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*, Thieler e Danforth (1994)). Após determinar a ordem de variação da posição da linha de costa, utilizou-se o modelo

LITMOD para simular a evolução do trecho costeiro tendo como condição inicial três linhas de costa distintas. Assim, foi possível avaliar em que medida a utilização de diferentes imagens e, consequentemente, linhas de costa iniciais influenciam os resultados da sua evolução a longo prazo.

## 2. DADOS E MÉTODOS

### 2.1. Extração de linhas de costa obtidas por diferentes sensores

Foram utilizadas cinco imagens de satélite, de três sensores distintos para a praia da Torreira, Aveiro, Portugal (Tabela I). As imagens de satélite não foram adquiridas no mesmo dia e à mesma hora, pelo que foi necessário verificar a altura da maré para cada imagem (Fig. 1). Definiu-se uma pequena área de estudo onde a linha de costa fosse evidente em toda as imagens. A área escolhida foi o trecho de costa com cerca de 1.91 km na Praia da Torreira.

No caso das imagens obtidas pelos satélites Sentinel, cuja resolução do pixel é de 10 m, a diferença entre marés foi ignorada, por terem sido obtidas em dias consecutivos onde a variação da altura da maré não sofreu uma alteração importante ( $\pm 10$  cm) (Fig. 1). No caso da imagem Landsat 8 adquirida no dia 30 (5 a 4 dias depois das imagens Sentinel), a diferença entre a altura da maré verificada foi de  $\pm 50$  cm. Apesar da praia ser considerada dissipativa segundo Ferreira *et al.*, (1994) sendo possível observar uma grande flutuação em planta entre a preia-mar e a baixa-mar, ignorou-se também a altura da maré no instante em que foi adquirida a imagem, devido à sua resolução ser de 30 m.

Tabela I. Descrição dos satélites e sensores das imagens utilizadas para o estudo comparativo da linha de costa.

Satélite	Sensor	Data/hora	Resolução (m)	Pré-processamento
Sentinel 2	Banda do visível (RGB)	25/05/2017 12:23:37	10	Não
Sentinel 2	NIR	25/05/2017 12:23:37	10	Não
Landsat 8	Banda do visível (RGB)	30/05/2017 11:13:26	30	Não
Sentinel 1	SAR, imagem de intensidade Polarização VV	26/05/2017 18:26:49	10	Sim <sup>1</sup>
Landsat 8	TIR	30/05/2017 11:13:26	30	Não

<sup>1</sup> Calibração, *Debrust e Multilooking* no software SNAP.

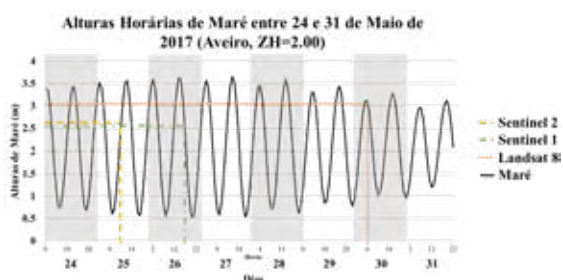


Fig. 1. Data e hora de aquisição das imagens de Satélite e alturas de maré. Dados fornecidos por: Instituto Dom Luiz (FCUL).

Determinou-se para cada imagem de satélite uma linha de costa, definida como a linha “seco/molhado” no caso das imagens óticas, e definida pelo pixel intermédio entre o maior contraste no caso da imagem SAR, extraída manualmente. Apesar deste indicador em imagens de satélite poder ser influenciado pelo run-up, optou-se por não ter em consideração o mesmo devido à resolução das imagens analisadas. Foi também considerada uma linha de referência (*baseline*) em relação à qual se mede a posição da linha de costa. De seguida, projetaram-se oito transectos utilizando o DSAS (Thieler e Danforth, 1994), com espaçamento de 100 m. A posição de cada linha de costa foi calculada em cada transecto. Calculou-se também a envolvente definida pela linha de costa mais afastada e a mais próxima da *baseline*.

## 2.2. Modelação da evolução da linha de costa

Para verificar a influência da variabilidade inicial da linha de costa foram construídas sinteticamente duas linhas a partir de uma linha de costa inicial real. Esta linha real foi também utilizada por Vicente e Clímaco (2015), e é identificada como Cenário 1. As outras duas derivadas desta constituem os Cenários 2 e 3. Apesar do estudo de Vicente e Clímaco (2015) abranger todo o trecho Douro-Cabo Mondego, o presente focou-se no subtrecho Torreira – Mira. Tirou-se partido do facto de se possuir dados de agitação marítima e de morfologia de todo o trecho, para minimizar o efeito das condições de fronteira na evolução da linha de costa.

As linhas de costa dos Cenários 2 e 3 foram produzidas a partir da linha do Cenário 1 (Fig. 2), recorrendo aos seguintes passos:

- Escolha de troços nos quais serão gerados valores aleatórios de modo a alterar a linha original do Cenário 1, seguindo a sua tendência. Os valores foram escolhidos tendo em conta que a diferença não poderia ser superior a  $\pm 25$  m (Fig. 2). Este valor foi escolhido por representar um valor intermédio das diferentes resoluções das imagens de satélite (10 e 30 m) simulando-se assim o “erro” da extração da linha de costa.

- Após a obtenção das novas linhas de costa, foi aplicada uma média móvel de 10 pontos, com o intuito de as suavizar.

Os Cenários 2 e 3 apresentam uma distância média quadrática relativas ao Cenário 1 de 10.26 m e 13.17 m, respetivamente (Fig. 3), ou seja, muito próximas.

Foram simuladas, recorrendo ao LITMOD, as posições da linha de costa após um, dois, cinco e dez anos, e os volumes sólidos transportados e acumulados entre secções. Encontra-se na Tabela II a configuração do modelo utilizada no presente trabalho, idêntica à utilizada por Clímaco e Vicente (2015). Para o cálculo do caudal sólido foi utilizada a fórmula de Kamphuis (1991).



Fig. 2. Linhas de costa dos cenários em estudo.

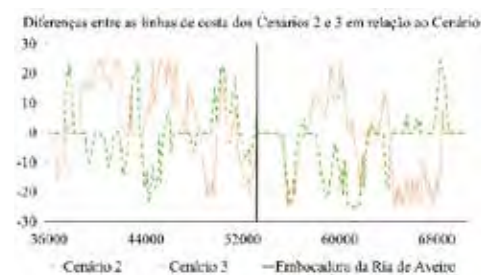


Fig. 3. Diferenças entre as linhas de costa dos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Linhas de costa obtidas por diferentes sensores

Os resultados das linhas de costa determinadas a partir das diferentes imagens de satélite encontram-se representados na Fig. 4. Na Tabela III figuram as distâncias entre as linhas de costa extraídas. Como a altura da maré foi ignorada na avaliação das diferenças da posição da linha de costa entre sensores, assumiu-se que esta diferença era devida exclusivamente às características dos diferentes sensores.

Tabela II. Parâmetros utilizados na configuração do modelo.

Linha de costa real	Carta militar de 1948
Condições de fronteira <sup>1</sup>	Recuo paralelo à linha de costa inicial, tipo Dirichlet.
Domínio de cálculo longitudinal	Total: Torreira – Cabo Mondego (cerca de 69,6 km) Trecho analisado: 34,5 km
Discretização temporal	0.01 dia (14,4 min)
Discretização espacial	Células com 100 m de comprimento (696 células total; 345 células subtrecho analisado)
Condições de agitação marítima	Serie cronológica de dados sintéticos (Dodet <i>et al.</i> ; 2010), com dados referentes à batimétrica de 60 m, propagada paralelamente <sup>2</sup> até à batimétrica 13 m.
Climas de agitação	Total: 17 Trecho analisado: 10 <sup>3</sup>
Nível de água	Nível médio de maré (2.0 ZH)
Diâmetro médio do sedimento (D <sub>50</sub> )	0.5 mm
Espessura da camada erodível do perfil	14.5 m

<sup>1</sup> Condições de fronteira aplicadas nos extremos de todo o trecho, sendo que a o trecho analisado encontra-se no interior do mesmo.

<sup>2</sup> O modelo LITMOD possui uma sub-rotina de cálculo de ondas que permite, a partir dos valores indicados referentes à batimétrica 60m, calcular de forma iterativa a profundidade de rebentação e as alturas e ângulos de onda nesse ponto, supondo a batimétrica paralela à linha de costa (Vicente e Clímaco, 2003).

<sup>3</sup> Climas de agitação distribuídos ao longo do subtrecho em estudo (Torreira-Mira), existindo no total 17 climas em todo o trecho simulado.

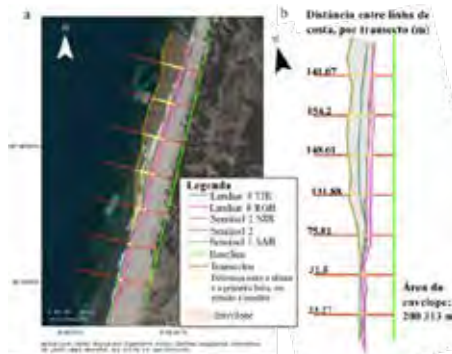


Fig. 4. a: Linhas de costa traçadas para cada imagem e linha de referência (baseline), bem como os transeptos e a envolvente das diferenças entre as linhas de costa. b: Variação entre as linhas de costa limitantes em cada transepto, e área total da envolvente.

Tabela III. Distâncias máximas medidas nos transeptos, entre linhas de costas adquiridas por diferentes sensores, em metros.

Sensores	S.2 RGB	S.2 NIR	L.8 RGB	S.1 SAR	L.8 TIR
S.2 RGB		8.09	32.10	130.73	52.75
S.2 NIR			34.24	123.24	567.63
L.8 RGB				141.67	82.92
S.1 SAR					81.79

Salienta-se a discrepância entre a linha de costa adquirida pela imagem SAR e as restantes, principalmente, porque o ruído da imagem impediu a sua correta localização. Este ruído deve-se sobretudo à grande retrodifusão causada pela rebentação de ondas. É também necessário enfatizar que as imagens referentes aos sensores NIR e RGB do satélite Sentinel 2 são as que apresentam melhor coerência,

porventura por serem síncronos e serem sensores pertencentes ao mesmo satélite. A mesma coerência, contudo, não acontece para as linhas de costa extraídas para os dois sensores do satélite Landsat 8, nomeadamente no visível (RGB) e na banda TIR. Por outro lado, apesar da diferença entre resolução das imagens RGB dos satélites Sentinel 2 e Landsat 8, verificou-se uma razoável concordância entre as linhas de costa extraídas a partir destes dois sensores. Note-se que, admitindo um declive da face da praia da ordem de 0.08, (Silva *et al.*, 2009), uma variação de 0.5 m do nível da maré (Fig. 1) corresponderia sensivelmente a uma flutuação horizontal de 6 m, valor este a diminuir à diferença encontrada.

Resulta que as imagens óticas apresentam vantagem em relação às imagens SAR e de infravermelhos (NIR e TIR). Tal conclusão carece de confirmação a partir da análise de um maior número de imagens.

Convém acentuar que a diferença entre a posição da linha de costa detetada pelos diferentes sensores varia longitudinalmente (Fig. 4). Observou-se a norte uma diferença maior das posições da linha de costa, detetadas pelos sensores Sentinel 1 SAR e Landsat 8 TIR, do que a sul. Por outro lado, as imagens provenientes dos sensores RGB e NIR do satélite Sentinel 2 e do sensor RGB do satélite Landsat 8 não apresentam esta variação espacial, mantendo alguma uniformidade em todo o trecho.

### 3.2. Modelação da evolução da linha de costa utilizando o modelo LITMOD

As diferenças observadas na evolução da linha de costa entre os vários cenários encontram-se representadas na Fig. 5.

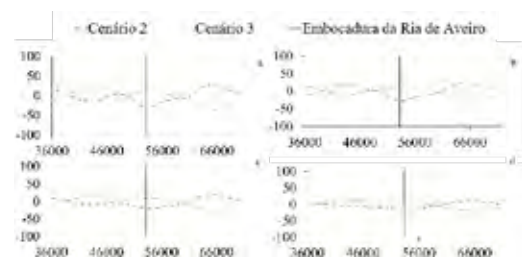


Fig. 5. Diferenças observadas entre cenários 2 e 3, em relação ao cenário 1, em a) 1 ano; b) 2 anos; c) 5 anos; d) 10 anos.

Verifica-se que no primeiro ano as diferenças entre os Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1 são muito evidentes, sendo que se atenuam à medida que o tempo de simulação avança. O cenário que apresenta maiores diferenças em relação ao cenário real é o Cenário 3, onde se verificou uma variação máxima de -36.9 m para o primeiro ano. Apesar deste cenário apresentar um valor máximo de desvio superior ao Cenário 2, este último apresenta valores absolutos médios mais elevados em toda a simulação. Observa-se também que os valores das médias quadráticas das diferenças observadas nos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1 diminuem ao longo do tempo da simulação, passando de 17.16 m e 15.73 m ao fim de

1 ano para 10.89 m e 7.99 m ao fim de 10 anos, respetivamente.

Ou seja, apesar de inicialmente as distâncias médias quadráticas serem muito próximas, elas são diferentes nos Cenários 2 e 3 ao fim de 10 anos, provavelmente por o Cenário 3 possuir uma configuração da linha de costa inicial mais suavizada comparativamente ao Cenário 2. Porém, as diferenças médias em relação ao cenário real são pequenas, tendo em conta a incerteza associada à utilização do modelo, bem como na utilização de dados de agitação marítima derivados de reconstituições de séries cronológicas. Pode-se então concluir, em relação à posição da linha de costa, que a utilização de linhas de costa iniciais com incertezas de  $\pm 25$ m não acarreta grandes alterações para a simulação da posição a médio longo prazo.

As diferenças de volumes sedimentares acumulados entre os Cenário 1 e os Cenários 2 e 3, ao fim de 10 anos e ao longo da costa, encontram-se representadas na Fig. 6. Os resultados mostram que existem diferenças significativas no volume sedimentar transportado e acumulado/erodido nas células (ou secções) selecionadas do modelo, apesar da proximidade entre linhas de costa finais (Fig. 5d). Ou seja, uma diferença significativa inicial entre linhas de costa tende a convergir para o mesmo resultado final, mas à custa de balanços e volumes acumulados muito diferentes.

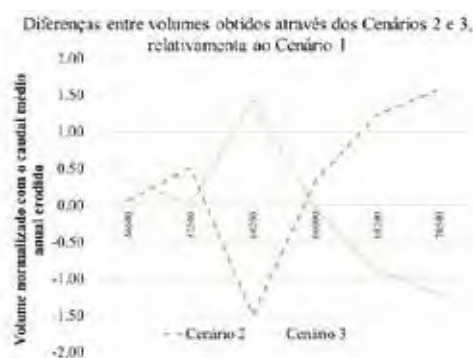


Fig. 6. Diferenças entre volumes acumulados calculados para os Cenários 2 e 3, em relação ao Cenário 1, ao fim de 10 anos de simulação.

#### 4. CONCLUSÕES

A utilização de imagens de satélite para a extração da linha de costa é um instrumento importante nos estudos de evolução costeira. Não serão de usar imagens SAR para extração da linha de costa em trechos de forte agitação caracteristicamente dissipativos onde as zonas de rebentação possuem um uma largura significativa. As imagens óticas apresentam vantagens, em relação às imagens SAR e de infravermelhos (NIR e TIR),

No respeitante às simulações numéricas, embora o Cenário 3 apresente uma linha de costa inicial mais suavizada, comparativamente Cenário 2, as diferenças finais (após 10 anos de simulação) na posição da linha de costa comparativamente ao

cenário real são insignificantes. Pode-se então concluir que a utilização de linhas de costa com uma incerteza de  $\pm 25$  m em relação à linha de costa real, conduz a resultados finais muito próximos das linhas de costa a médio/longo prazo. Verificou-se que as diferenças iniciais médias, para o cenário de referência, foram reduzidas entre 60% e 70% ao fim de 10 anos.

Em oposição, a mesma variabilidade relativa à precisão da determinação de linhas de costa dá origem, em média, a diferenças significativas nos volumes sedimentares acumulados, em simulações a médio-longo prazo (10 anos). Ou seja, os transportes sedimentares necessários para as evoluções das linhas de costa inicialmente distintas poderão ser muito diferentes localmente.

#### Agradecimentos

Fundação da Ciência e Tecnologia, no âmbito da bolsa de Doutoramento da autora Soraia Teixeira (PD/BD/128510/2017), e pelo projeto europeu Co-ReSyF (“funded from the EU Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N°687289”). Os autores agradecem o suporte prestado por Ana Bastos e Ana Maria Nobre Silva (FCUL) e por Victor Pisco (LNEC) na utilização do DSAS e do LITMOD, respetivamente.

#### REFERÊNCIAS

- Dodet, G., Bertin, X. e Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modeling*, 31 (3-4), p. 120-131.
- Ferreira, O., Dias, A. J., & Taborda, R. (1994). Wave energy dissipation on a high energy barred nearshore: A natural and effective coastal protection. *EuroCoast Portugal Symposium*, 369-381.
- Silva, R., Baptista, P., Veloso-Gomes, F., Coelho, C., Taveira-Pinto, F., (2009). Sediment grain size variation on a coastal stretch facing the North Atlantic (NW Portugal). *J. Coastal Res.*, SI56, 762-766.
- Thieler, E.R., and Danforth, W.W., (1994). Historical shoreline mapping (II): application of the Digital Shoreline Mapping and Analysis Systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico: *Journal of Coastal Research*, v. 10, no. 3, p. 600-620.
- Vicente, C. (1991). *Aperfeiçoamento de métodos de modelação matemática e física aplicáveis a problemas de dinâmica costeira*. LNEC, Lisboa
- Vicente, C., Clímaco, M. (2003). *Evolução das linhas e costa – Desenvolvimento e aplicação de um modelo numérico*. LNEC, Lisboa 2003.
- Vicente, C., Clímaco, M. (2015). *Evolução costeira do Douro ao cabo Mondego – Proposta de uma metodologia de estudo*. LNEC, Lisboa.

# Taxas de acumulação sedimentar no porto de pesca da Nazaré

L. I. Portela (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), E-mail: [lportela@lnec.pt](mailto:lportela@lnec.pt)

**Resumo:** O conhecimento dos processos de transporte sedimentar na enseada da Nazaré apresenta ainda algumas limitações. O presente estudo tem por objetivo analisar as taxas de sedimentação no porto de pesca, construído no início da década de 80. A análise baseia-se na comparação de levantamentos hidrográficos realizados desde 1983, mas principalmente entre 2004 e 2015. Obtiveram-se taxas de sedimentação médias da ordem de 0,03 m/ano, não se registando diferenças acentuadas entre os diferentes sectores do porto (anteporto, canal de acesso e bacia interior). Esta estimativa é coincidente com o esforço de dragagem conhecido. As elevadas profundidades na proximidade do porto e a orientação do trecho costeiro parecem contribuir para a inexistência de problemas de dinâmica sedimentar. Contudo, recomenda-se o acompanhamento da evolução da praia da Nazaré, imediatamente a norte, dado o seu progressivo robustecimento, induzido pelo molhe norte do porto.

**Palavras-chave:** levantamentos hidrográficos, Nazaré, portos, sedimentação, transporte sedimentar.

## 1. INTRODUÇÃO

O porto de pesca da Nazaré situa-se num trecho de costa arenosa, numa enseada, 1500 m a sul de um promontório. Devido à proximidade do canhão da Nazaré, registam-se nesta enseada profundidades de 100 m a apenas 800 m da praia. O canhão é considerado um obstáculo dificilmente transponível pelo sedimento proveniente do trecho costeiro a norte (Abecasis, 1997; Duarte *et al.*, 2014).

Os processos sedimentares em áreas portuárias situadas em trechos de costa arenosa são de grande importância para a sua manutenção. Quando se projetou o porto da Nazaré, nos anos 70, foi sentida a necessidade de avaliar as implicações do transporte litoral nas obras a construir. Dada a especial complexidade dos fundos marinhos, foram realizados ensaios com areias marcadas (Pereira e Castanho, 1976). Embora revelando que parte das areias não se perdia para os grandes fundos, os resultados foram considerados encorajadores da localização do porto na foz do rio Alcoa.

Passados mais de 30 anos sobre a construção do porto, o presente trabalho pretende avaliar o seu comportamento, confirmando ou não as previsões iniciais, a partir do cálculo de taxas de sedimentação no interior do porto, com base em levantamentos, e de uma análise sumária da evolução da zona exterior próxima do molhe norte.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O porto da Nazaré, construído na antiga foz do rio Alcoa, entretanto desviada para sul, foi inaugurado em 1983. A sua entrada, com 100 m de largura, encontra-se protegida por dois molhes. O molhe norte tem cerca de 250 m de comprimento, tendo sofrido obras de reparação em 2015 (Santos-Ferreira *et al.*, 2015), e o molhe sul cerca de 400 m.

O porto é constituído por três sectores distintos, anteporto (-6 m ZH), canal de acesso (-6 a -5 m ZH) e bacia interior (-5 a -2 m ZH), apresentando uma área total de cerca de  $0,2 \times 10^6 \text{ m}^2$ .

Em 2009, foi executada uma dragagem de manutenção, com volume previsto de  $0,11 \times 10^6 \text{ m}^3$ , envolvendo areias, siltes e lodos, com repulsão das areias limpas do anteporto para as praias a sul (IPTM, 2008; Portela, 2017).

O trecho de costa onde se situa o porto apresenta orientação (NE-SW) diferente da que se verifica a norte do promontório (NNE-SSW).

As praias da enseada da Nazaré são formadas por areias médias e grossas, com diâmetros menores do que os registados no trecho costeiro a norte (valores típicos de  $D_{50}$  de 0,7 mm e 1,1 mm, respetivamente; Pereira e Castanho, 1976).

A agitação marítima ao largo apresenta direção dominante de NW, mas o canhão da Nazaré e o abrigo proporcionado pelo promontório exercem forte influência sobre a sua propagação até à costa (Silveira *et al.*, 2016).

## 3. METODOLOGIA

Foram comparados levantamentos hidrográficos de 2000, 2004, 2009 (de pré e pós-dragagem), 2014 e 2015, com espaçamentos entre sondas variáveis de 15 m a 5 m. Os levantamentos de 2000 e 2004 (B.H. nº1 Viana do Castelo, jun./2000 e out.-dez./2004) abrangem a totalidade do porto. Os levantamentos de 2009 (CPTP) abrangem também todo o porto, com exclusão, no de pós-dragagem, de uma área não dragada do anteporto. Os levantamentos de 2014 e 2015 (Etermar, set./2014 e set./2015) cobrem, o primeiro, o anteporto e, o segundo, o canal de acesso e parte da bacia interior.

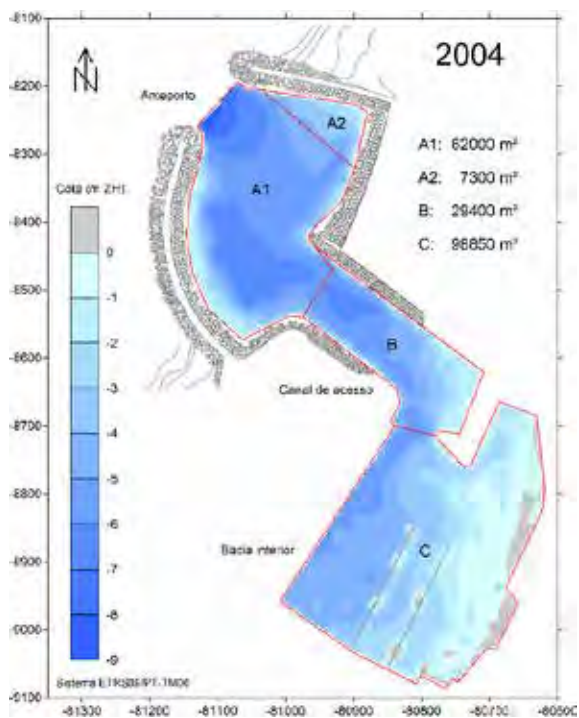


Fig. 1. Levantamento topo-hidrográfico de 2004: localização dos sectores analisados e suas áreas.

Utilizou-se o programa Surfer (versão 8.04) para criar malhas de cada um dos seis levantamentos, com passo espacial de 5 m, por *kriging*, e calcular variações volumétricas entre eles.

Consideraram-se quatro sectores distintos: (A1) área principal do anteporto (62 000 m<sup>2</sup>); (A2) área secundária, não dragada em 2009 (7300 m<sup>2</sup>); (B) canal de acesso (29 400 m<sup>2</sup>); e (C) bacia interior (98 850 m<sup>2</sup>). Estes sectores perfazem uma área total de 197 550 m<sup>2</sup> (Figura 1).

Para a análise da zona exterior, foi ainda utilizado um levantamento de 1983 (Meira, out./1983), juntamente com o de 2014 acima referido.

#### 4. RESULTADOS

As cotas médias do fundo, as alturas de dragagem em 2009 e as taxas de sedimentação médias anuais calculadas em cada sector são apresentadas nas Tabelas I, II e III. O levantamento de 2000 apresenta cota média superior em 0,30 m ao de 2004; dada a aparente inconsistência com os restantes dados, foi excluído da análise (cf. Tabela III).

As taxas de sedimentação mais elevadas foram obtidas com base nos levantamentos anteriores à dragagem. Entre 2004 e 2009 (Figura 2), verifica-se uma acumulação de 52 688 m<sup>3</sup> em 5 anos (cerca de 10 500 m<sup>3</sup>/ano). Este valor equivale a uma taxa de sedimentação média de 0,053 m/ano. A evolução do anteporto e dos restantes sectores pode considerar-se relativamente uniforme.

Na comparação dos levantamentos de pré e pós-dragagem, em 2009 (Figura 3), foi calculada uma

escavação de 135 273 m<sup>3</sup>, valor um pouco superior ao volume de dragagem previsto no projeto (113 000 m<sup>3</sup>; IPTM, 2008).

As menores taxas de sedimentação foram obtidas com os levantamentos mais recentes: 0,024 m/ano na área principal do anteporto, entre 2009 e 2014 (Figura 4a); 0,034 m/ano na área não dragada, entre 2004 e 2014 (Figura 4b); e valores quase nulos (0,011 e -0,003 m/ano) no canal de acesso e parte da bacia interior, entre 2009 e 2015 (Tabela III).

No seu conjunto, as taxas de sedimentação calculadas por comparação de levantamentos apresentam um valor médio ponderado de 0,03 m/ano.

Por outro lado, entre o estabelecimento do porto e a dragagem de 2009, que terá sido a primeira intervenção de manutenção, decorreram cerca de 25 anos. Sabe-se que os fundos em 1984-1985 não eram substancialmente diferentes do plano de dragagem de 2009 (IH, 1986; IPTM, 2008). Admitindo uma taxa de sedimentação de 0,03 m/ano, equivalente a cerca de 6000 m<sup>3</sup>/ano, determina-se em 25 anos uma acumulação sedimentar (150 000 m<sup>3</sup>) muito próxima do volume dragado em 2009.

#### 5. DISCUSSÃO

A taxa de sedimentação média no porto da Nazaré obtida neste estudo envolve alguma incerteza, dada a origem muito diversa dos levantamentos utilizados e a própria exclusão de um deles. Porém, afigura-se credível, tendo em conta a proximidade entre os valores estimados por comparação de levantamentos e com base no esforço de dragagem.

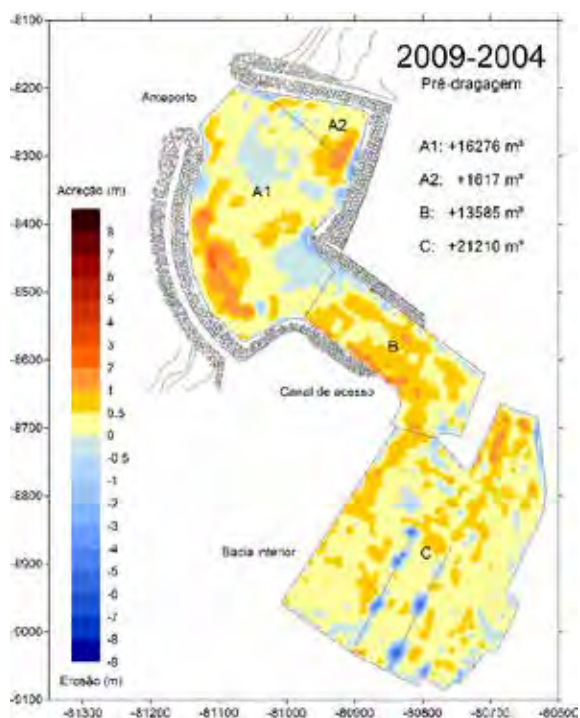


Fig. 2. Comparação de levantamentos hidrográficos: 2009-2004, sendo o levantamento de 2009 de pré-dragagem. Indicam-se os volumes de sedimentação em cada sector.

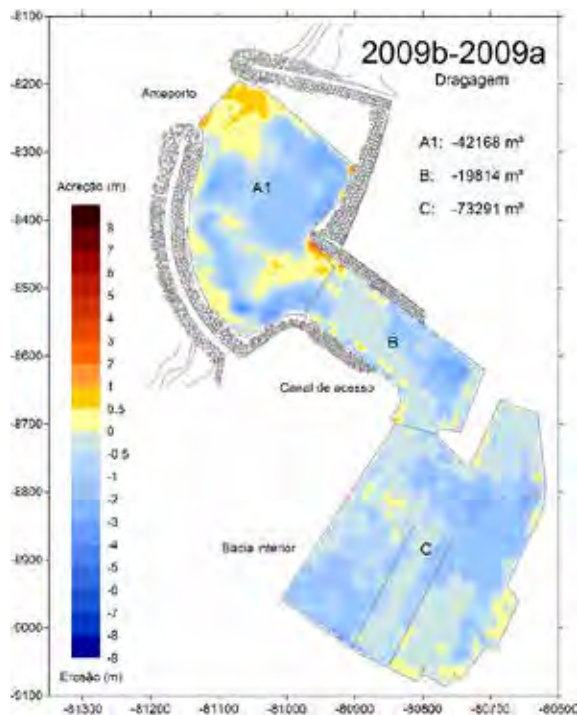


Fig. 3. Comparação de levantamentos hidrográficos, de pré e pós-dragagem, de 2009. Indicam-se os volumes de sedimentação em cada sector (valores negativos: escavação).

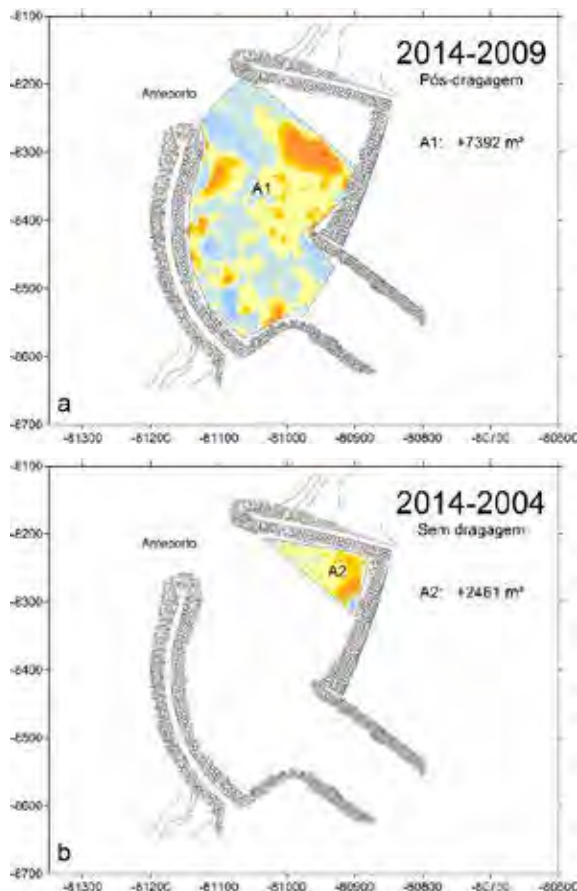


Fig. 4. Comparação de levantamentos hidrográficos: a) 2014-2009 (pós-dragagem); b) 2014-2004 (área não dragada). Escala de cores idêntica às Figs. 2 e 3.

Tabela I. Cota média do fundo por sector.

Ano	Cota média (m)				
	A1	A2	B	C	Total
2000	-4,60	-3,01	-3,70	-2,24	-3,23
2004	-5,12	-3,28	-4,07	-2,39	-3,53
2009a	-4,86	-3,06	-3,61	-2,17	-3,26
2009b	-5,54	-	-4,29	-2,91	-
2014	-5,42	-2,94	-	-	-
2015	-	-	-4,22	-	-

Tabela II. Altura de dragagem em 2009.

	Altura de dragagem (m)				
	A1	A2	B	C	Total
2009b-2009a	-0,68	-	-0,67	-0,74	-

Tabela III. Taxa de sedimentação média anual.

	Taxa de sedimentação (m/ano)				
	A1	A2	B	C	Total
2009a-2004	0,053	0,044	0,092	0,043	0,053
2014-2009b	0,024	-	-	-	-
2014-2004	-	0,034	-	-	-
2015-2009b	-	-	0,011	-0,003	-
$\bar{x}_{pond.}$	0,038	0,037	0,048	0,018	0,030

Os resultados parecem confirmar a previsão inicial, de que não seriam de esperar problemas de dinâmica sedimentar associados à instalação do porto na foz do rio Alcoa (Pereira e Castanho, 1976). Com efeito, a taxa de sedimentação é pouco importante e não se observam fenómenos de assoreamento na zona de entrada, como os que se registam em outras áreas portuárias.

O comportamento do porto é consistente com um transporte sedimentar relativamente fraco no trecho costeiro, em comparação com o que se verifica a norte do promontório da Nazaré (Pereira e Castanho, 1976; Duarte *et al.*, 2014). Para isso, devem contribuir: (a) a captura do transporte litoral pelo canhão da Nazaré, bem como a presença de grandes fundos junto ao porto e à praia situada imediatamente a norte; e (b) a orientação do trecho, menos oblíqua em relação à resultante da agitação do que a norte do promontório, e a menor altura de onda na enseada.

Com base nos resultados obtidos, a sedimentação no porto representará menos de 1% do transporte litoral a norte do promontório da Nazaré.

Ainda assim, desde a construção do porto, tem-se assistido a um gradual robustecimento da praia da Nazaré, induzido pelo molhe norte. Esta tendência, e o recuo da linha de costa a sotamar, sugerem algum transporte dirigido para sul.



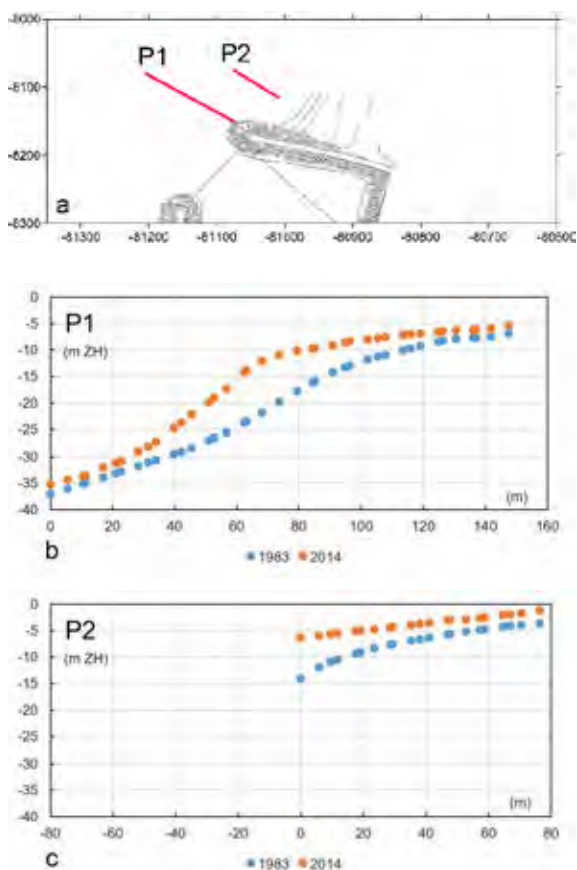


Fig. 5. Comparação de perfis transversais na zona do molhe norte, extraídos de levantamentos de 1983 e 2014: a Localização dos perfis; b Perfil P1; c Perfil P2.

Apresentam-se na Figura 5 dois perfis transversais da zona exterior próxima do molhe norte, traçados com base em levantamentos de 1983 e 2014. O perfil P1 revela um acréscimo médio de área da secção transversal de 20 m<sup>2</sup>/ano e o perfil P2 (incompleto) um acréscimo de 8,5 m<sup>2</sup>/ano. No caso do perfil P1, esse acréscimo de área verifica-se entre as cotas -5 e -40 m ZH, isto é, em grande parte abaixo da profundidade de fecho teórica (admitindo, para esta, um valor máximo de -16 m ZH).

Não se exclui a possibilidade de, no futuro, com a continuação do alargamento da praia e a saturação do molhe norte, se registar um aumento da entrada de areia no anteporto. Porém, este processo será provavelmente mitigado pelo elevado declive do perfil transversal (da ordem de 1:5, mas atingindo 1:3 entre as batimétricas -10 e -25 m ZH) e pelas elevadas profundidades a que se verifica a acumulação sedimentar.

## 6. CONCLUSÕES

O porto de pesca da Nazaré apresenta condições de manutenção muito favoráveis, do ponto de vista da dinâmica sedimentar.

Estimou-se, por comparação de levantamentos, uma taxa de sedimentação média de 0,03 m/ano, com variação entre os diferentes sectores pouco

significativa (0,02-0,05 m/ano). Esse valor é consistente com o volume de dragagem de manutenção conhecido, equivalente, em 25 anos, a uma taxa média praticamente uniforme nos vários sectores de 0,02-0,03 m/ano.

Para a reduzida taxa de sedimentação, parecem contribuir a reduzida resultante do transporte sedimentar litoral e as elevadas profundidades na proximidade do porto.

Recomenda-se a continuação do acompanhamento da evolução do porto, mas também da praia da Nazaré, a norte, dada a possibilidade de alteração da situação atual em consequência do gradual alargamento da praia e enchimento do molhe norte.

## Agradecimentos

O autor agradece à Direção-Geral dos Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM) os levantamentos disponibilizados.

## REFERÊNCIAS

- Abecasis, F. (1997). Caracterização geral geomorfológica e aluvionar da costa continental portuguesa. *Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*, Porto, 9-24.
- Duarte, J., Taborda, R., Ribeiro, M., Cascalho, J., Silva, A. e Bosnic, I. (2014). Evidences of sediment bypassing at Nazaré headland revealed by a large scale sand tracer experiment. 3.<sup>as</sup> *Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 289-292.
- IH (1986). Carta hidrográfica da Enseada da Nazaré (levantamento 1984-1985), 1ª edição. Instituto Hidrográfico, Lisboa.
- IPTM (2008). Empreitada de execução de dragagens de manutenção no Porto da Nazaré. Projecto de execução. Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos, Lisboa.
- Pereira, M.C. e Castanho, J.P. (1976). Estudo do esquema geral de obras portuárias na enseada da Nazaré: ensaios com areias marcadas. Proc. 63/1/5205, LNEC, Lisboa.
- Portela, L.I. (2017). Plano plurianual de dragagens portuárias 2018-2022. Relatório 417/2017-DHA/NEC, LNEC, Lisboa.
- Santos-Ferreira, A., Cabral, M. e Santos, C. (2015). The rehabilitation of north breakwater of Nazaré harbor. *Procedia Engineering* 116, 755-762.
- Silveira, T.M., Taborda, R., Carapuço, M.M., Andrade, C., Freitas, M.C., Duarte, J.F. e Psuty, N.P. (2016). Assessing the extreme overwash regime along an embayed urban beach. *Geomorphology*, 274, 64-77.

# Modelling the beach morphodynamics in defence schemes of combined groyne fields and seawalls under storm conditions

J. N. C. Oliveira (1,2), F. S.B.F. Oliveira (2), A. A. Trigo-Teixeira (1)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal.  
[joao.c.oliveira@tecnico.ulisboa.pt](mailto:joao.c.oliveira@tecnico.ulisboa.pt)

(2) Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. [joliveira@lnec.pt](mailto:joliveira@lnec.pt)

**Abstract:** The rise of the mean sea level and the expected increase of frequency and intensity of maritime storms increase the risk of coastal erosion. The defence schemes implemented in the Portuguese coast need to be adapted and an improved understanding of the hydro-sedimentologic structure induced processes is essential. Process-based morphodynamic models simulate the complex hydrodynamic and morphological behaviour of the nearshore and allow the study of interactions between different structures. This study focuses on the application of the XBeach model to simplified morphological conditions of the coastal area south of Figueira da Foz, where a combined groyne and seawall defence scheme is implemented. The results show that the model can simulate the morphological evolution changes when adding seawalls to an existing groyne field under storm conditions in agreement with the present understanding of the processes, and accounts for the more complex interactions generated in this type of coastal defence schemes.

**Key words:** Numerical modelling, XBeach, nearshore, groyne field, seawall.

## 1. INTRODUCTION

The understanding of the complex processes of coastal resilience supports the sustainable land use planning models and validate risk and intervention management policies in the coastal area. The recommended national policy for the present and future of the coastal zone is that the human occupation and activities in the coastal zone should respect and adapt to the present and future coastal dynamics (Santos *et al.*, 2014). Erosion is a process resulting from negative sediment transport budgets derived from sediment unavailability. It can be caused by, among others factors: i) episodic and storm-induced erosion with possibility of post-storm recovery; ii) spatial changes in wave climate, tidal currents or sediment composition that induce changes in longshore transport; iii) obstruction of the longshore transport, due to the presence of natural or artificial barriers; or iv) continuous offshore-directed transport due to the presence of sinks that continuously trap sediments (e.g. deep channels or canyons) or man-made structures producing offshore-directed rip currents (Van Rijn, 2013).

Some of the Portuguese maritime fronts that are now seriously threatened by erosion have already been intervened in last four decades, through the construction of shore-normal coastline stabilization structures (groynes) and longshore defences (seawalls). The existing coastal defence structures are aging, and the surrounding sandy beaches are increasingly fragile and vulnerable, exposing the communities to increased hazard. In many cases, due

to changes in the coastal dynamics, the structures require an upgrade in order to optimize the benefit of the surrounding beach stability. Even though the scientific knowledge on the nearshore processes and the modelling approaches of the nearshore dynamics has largely increased since then, little is known on how the processes involved in the sea-structure-sediments interactions affect the surrounding morphodynamics and how much do these effects vary with the hydrodynamic and geomorphologic characteristics of the coastal environment (Van Rijn, 2013; Van der Salm, 2013; Van der Hoeven, 2010).

The defence schemes implemented in the Portuguese coast in the last century requires urgent revision to accomplish effective, optimized and sustainable coastal protection, and new understanding of the hydro-sedimentologic structure induced processes is essential. Process-based morphodynamic models simulate the complex hydrodynamic and morphological behaviour of the nearshore and allow the study of interactions between different structures. Recent morphodynamic simulations with the Delft3D and XBeach numerical models for a simplified case study, an alongshore uniform coast intercepted by a sloping groyne implemented over an initial uniform slope, proved that these models allow for the identification of driving processes and the sensitivity assessment of certain parameters for the environmental test conditions (Trouw *et al.*, 2012). However, knowledge on how the models behave under a much more energetic environment such as the Portuguese west coast is still lacking. Nederhoff (2014) applied the XBeach model to

investigate the effects of hard elements on the erosion processes during storm surges and concluded that in the cross-shore direction the seawall cuts off the sediment supply to the beach and that, since less sediment can be deposited in the nearshore, the efficiency in dissipating wave energy is lower, leading to higher energetic conditions in front of the seawall, which can result in the development of a local scour hole.

This study focuses on the application of the XBeach model to simplified morphological conditions of the coastal area south of Figueira da Foz, where a combined groyne and seawall defence scheme is implemented. The hydrodynamic conditions correspond to an adaptation of an extreme storm event in the Portuguese West Coast. The main goal is to assess the model's sensitive to the morphological evolution effects of adding seawalls to an existing groyne field and accounting for the more complex interactions generated in this type of coastal defence schemes under such energetic conditions.

## 2. DATA AND METHODS

The morpho-sedimentologic and hydrodynamic characteristics considered in this study correspond to the representative conditions of the sandy coastal stretch south of the Cabo Mondego headland, bounded at north by the Mondego river's inlet ( $40^{\circ}8'45''$  N and  $8^{\circ}52'42''$  W), and at south by the river Lis' inlet ( $39^{\circ}52'50''$  N and  $8^{\circ}58'18''$  W), with an approximate orientation of NNE-SSW.

Gala-Cova, located approximately 1.5 km south of the Mondego river's inlet, is one of the Portuguese maritime fronts threatened by erosion and inundation, particularly during extreme maritime events, when high spring tides and high incident wave heights, can cause primary dune overwashing and lowering of the beach in front of the seawalls (APA, 2014). This coastal stretch is protected by a combined groyne field and seawall defence scheme. In contrast to the sediment accumulation updrift of the long north jetty in the Mondego river's inlet, in Figueira da Foz (Fig. 1-a), the southern beaches face serious erosion problems, particularly troublesome in Gala-Cova, Costa de Lavos and Leirosa, with urban infrastructures and agricultural land at risk in periods of maritime winter, as during the Hercules storm in January 2014.

In the winter of 1974-1975, the seawall in Gala/Cova was built as an emergency intervention to protect the dune from the sea advances. For three years, from 1973 to 1975, a local artificial beach nourishment of  $210\,000\text{ m}^3$ , 50 m south of the south jetty, was performed to restore the beach width. In 1978 the seawall was raised 1 m, but a different protection scheme was needed to effectively stabilize the coastline and, in 1979, the groyne field was built (Fig. 1-b). It consists of 5 groynes, four

100 m long and a fifth southern one with length of 150 m. The existing seawall between the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> groynes is 220 m long, between the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> groynes there's no seawall but dune, and between the 3<sup>th</sup>, 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> groynes the seawalls are 220 and 200 m in length, respectively. These features are visible in Fig. 1-b.

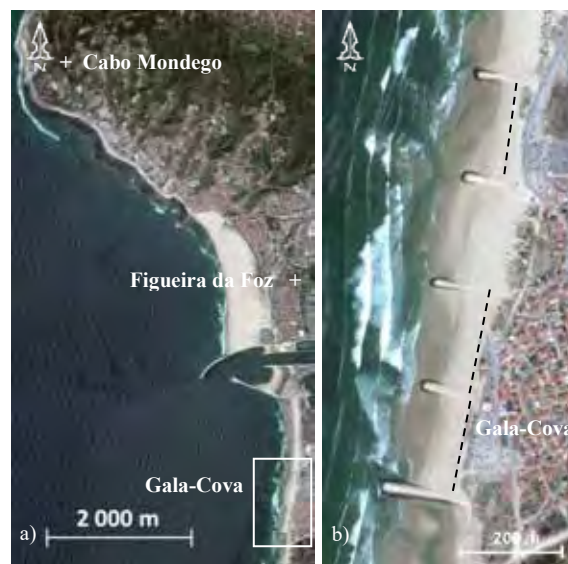


Fig. 1. Satellite view of: a) the coastal stretch between Cabo Mondego and Gala-Cova; b) Gala-Cova groyne field and seawalls (dashed lines); as imaged by Google Earth in August 3, 2015.

### 2.1. Topo-hydrography and sedimentology

The computational model's initial morphology is based in the aforementioned coastal stretch's representative beach profile, as defined by Oliveira (2016). It is uniform alongshore and consisting of three slopes (Fig. 2): 1:77 in the submerged profile, between -12 m below chart datum reference level (ZH) and ZH; 1:25 in the beach face, between ZH and 4 m above ZH; and 1:3.5 in the frontal dune, between 4 and 14 m above ZH. The computational domain extended 2500 m in the alongshore direction and 1100 m in the cross-shore direction, in a uniform grid with a resolution of  $dx=dy=5$  m. The groyne field consisted of three 20 m wide groynes with the head implemented at ZH and a crest height 5 m above ZH, equally spaced in 220 m and extending 100 m long. The outer groynes were implemented 750 and 1250 m away from the north and south boundaries of the computational domain, respectively. A 220 m long seawall was implemented between the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> groynes with the structure toe at 4 m above ZH and crest height 5 m above ZH.

The sediment characteristics were considered uniform in the study site, based on information from previous local studies (Oliveira *et al.* 2016), with a representative sediment median diameter,  $d_{50}$ , equal to 0.30 mm, and a  $d_{90}$  equal to 0.50 mm.

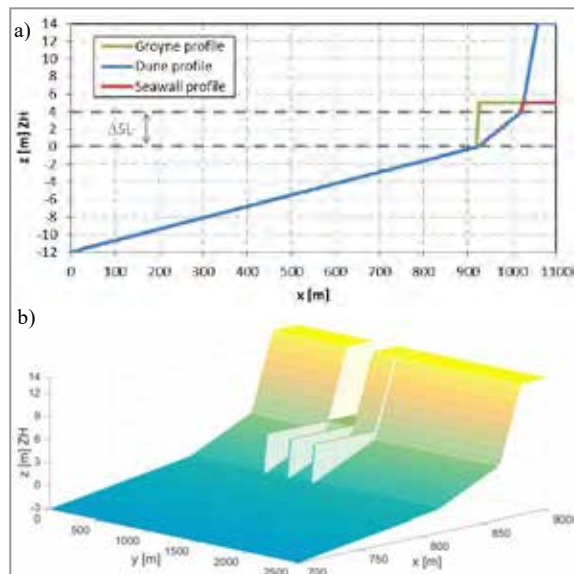


Fig. 2. Initial bottom configuration of the morphodynamic model: a) representative beach and coastal defence structures profiles; b) 3D-view.

## 2.2. Hydrodynamic conditions

The wave series applied at the offshore boundary to force the morphological evolution consisted on the Sines buoy records of the Hercules storm (the most severe synoptic buoy records), from the 4<sup>th</sup> to the 7<sup>th</sup> of January 2014 (APA, 2014). A constant mean wave direction (Dir) of 280°N was considered as the representative Dir for this coastal stretch (10° north obliquity to the shoreline), as determined by Oliveira *et al.* (2016).

The considered sea level time series was obtained using astronomical tide hindcast data (WXTide32 model) for Figueira da Foz. It was considered a period of a spring tide event with a sea level variation between 0.28 and 3.70 m above ZH.

A Neumann type boundary condition was considered for the lateral open boundaries, imposing a constant water level gradient, and for the offshore boundary a weakly reflective-type boundary

condition (absorbing-generating) was imposed.

## 2.3. Numerical modelling

The morphodynamic model applied in this work was XBeach (eXtreme Beach behaviour, Roelvink *et al.*, 2009), developed to assess the natural coastal response to time varying storm and hurricane conditions by solving coupled 2DH momentum equations. It applies a non-stationary long wave flux at the boundary, which then serves to solve the propagation of the short-wave envelope, the non-stationary shallow water equations, sediment transport and bed update. Computing the balance between onshore sediment transport driven by wave skewness and asymmetry and offshore transport driven by the return flow, allows to predict dune erosion, overwash and breaching.

The values of the model parameters applied were calibrated in a study conducted by Oliveira (2011) on dune erosion in a beach-dune system with the morphological numerical models XBeach and LITPROF and generally validated for several storm conditions in Roelvink *et al.* (2009). The model was run in the surfbeat mode (instationary), allowing the modelling of infragravity waves.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The 2DH morphological results for the computational domain and the beach profiles centered at the seawall cell (cell 1) and the dune cell (cell 2) are presented in Fig. 3.

The overall morphological evolution was reproduced in the model domain as expected for generic storm conditions, showing the numerical model can simulate the main morphodynamic processes related to wave-structure-sediments interaction. A significant accumulation updrift and erosion downdrift of the structures was not expected for a short simulation period (96hr) and a wave obliquity of 10°. The formation of a longitudinal submerged bar was observed as expected, consequence of the

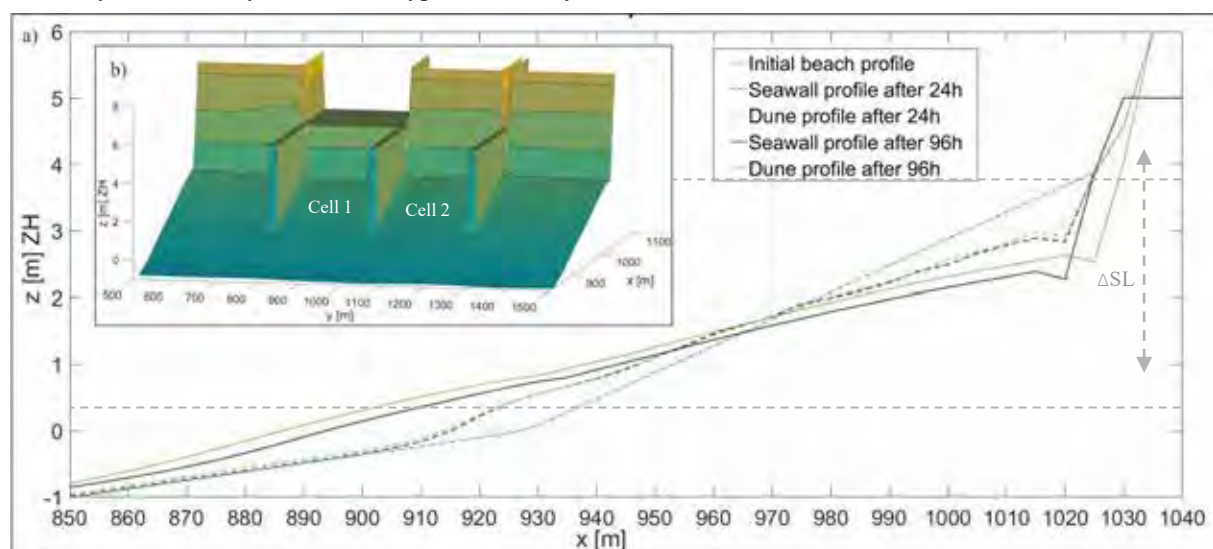


Fig. 3. Bottom configuration of the morphodynamic model: a) seawall and dune profiles after 24 and 96 hours; b) 3D-view after 96 hours.

dominating seawards cross-shore sediment transport.

During the first 24h there was a lowering of the upper beach face profile for both the dune and seawall cells, and an elevation of the lower beach face and upper submerged profiles. In cell 1, the lowering of the upper profile was enhanced by the seawall and thus the elevation of the submerged profile was lower than the predicted for cell 2. In the subsequent simulation period, the retreat of the dune toe in cell 2 started to occur, along with a continuous lowering of the upper profile zone and a seawards extension of the accumulation zone in the submerged profile. In cell 1, while the dune retreat was prevented by the hard structure, the upper beach face lowering increased due to scour in the seawall toe and the submerged profile accumulation was continuous.

The outcome for the 96hr storm induced morphological evolution revealed that: i) the cross-shore transport is dominant over the longshore transport (LT) and the initial profile evolves into a more dissipative beach profile; ii) the presence of the seawall causes a larger lowering of the profile in cell 1 due to the unavailability of dune sediments as opposed to cell 2, where the natural dune acts as a sediment source; iii) the natural development of the beach profile that occurs in cell 2 mobilizes a larger sediment volume that is accumulated beyond the groyne tip and available to be transported alongshore.

#### 4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The XBeach morphodynamic model was applied to assess the effect of a seawall in the morphological evolution of the surroundings of a groyne field during a maritime storm.

The results show that the model accounts for the hydro-morphological processes and the complex interactions generated in this type of coastal defence schemes under extreme storm conditions.

Even though the seawall avoids the retreat of the shoreline, when inserted in a groyne field cell it causes an increased erosion of the submerged profile compared to the natural evolution of a sandy dune cell.

Further research will be developed regarding the model's ability to simulate the medium-term beach morphological response to post-storm average hydrodynamic conditions.

#### Acknowledgements

The work described was supported by FCT through the Ph.D. Grant PD/BD/128508/2017 and the project CYTED 2017-PE-PROTOCOL.

#### REFERENCES

- APA (2014). Littoral occurrences records, the storm of January 3 to 7, 2014. Technical Report, *Agência Portuguesa do Ambiente (MAOTE)*, 123 pp.
- Nederhoff, C.M. (2014). Modelling the effects of hard structures on dune erosion and overwash. *MSc thesis*, Delft University of Technology, 169 pp.
- Oliveira, F.S.B.F. (2011). Erosão de dunas com os modelos XBeach e LITPROF. National Laboratory for Civil Engineering, DHA/NEC, Lisbon, 50 pp.
- Oliveira, F.S.B.F. (2016). Modelling morphological evolution in the surrounding area of a groyne: preliminary results. *4th Hydrographic Institute Scientific Journeys*, Hydrographic Institute, Lisbon, 241-244.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F., Teixeira, A.A.T. (2016). Coastline evolution south of the Mondego river inlet: modelling the impact of the extension of the north jetty. *4th Hydrographic Institute Scientific Journeys*, Hydrographic Institute, Lisbon, 245-248.
- Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A., Vries, J.T., McCall, R. and Lescinski, J. (2009) Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152.
- Santos, F.D., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L. and Taborda, R. (2014.) Coastal areas management – The challenge of change. *Grupo de Trabalho do Litoral*, Lisbon, 242 pp.
- Trouw, K., Zimmermann N., Mathys M., Delgado, R. and Roelvink, D. (2012). Numerical modelling of hydrodynamics and sediments transport in the surf zone: a sensitivity study with different types of numerical models. *Coastal Engineering Proceedings*, 1 (33).
- Van der Hoeven, R. (2010). Morphological impact of coastal structures. *MSc thesis*, Delft University of Technology, 102 pp.
- Van der Salm, G.L.S. (2013). Coastline modelling with UNIBEST: Areas close to structures. *MSc thesis*, Delft University of Technology, 91 pp.
- Van Rijn. L.C. (2013). Design of hard coastal structures against erosion. Online at URL <http://www.leovanrijn-sediment.com>.

# Grain-size selective longshore transport at a headland-bay beach: insights from a sediment tracer experiment

M. Ribeiro (1), R. Tabora (2), J. Duarte (1) and A. Rodrigues (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. [monica.ribeiro@hidrografico.pt](mailto:monica.ribeiro@hidrografico.pt)

(2) Instituto Dom Luiz, FCUL - Campo Grande Edifício C1, Piso 1, 1749-016 Lisboa.

**Abstract:** The present work aims to understand and quantify the grain-size effects on longshore sediment transport rates. The work is based on a tracer experiment performed at Grande beach (western Portuguese coast) using the continuous injection method. Results show that longshore drift decreases with the increase of grain-size, in agreement with previous works.

**Key words:** sediment sorting; fluorescent tracers; longshore drift.

## 1. INTRODUCTION

Most researchers recognize that magnitude of the longshore sediment transport (LST) depends not only on wave power, but also on site specific factors. Several dependencies have been suggested including a simple correlation with the beach sediment grain-size (or grain settling velocity), the beach slope, or more complex combinations of various environmental parameters (see for example, Komar, 1988). However, previous works also recognize that more studies based on field data would be necessary in order to properly establish a relation between these factors and LST rates, contributing for the improvement of LST predictions.

The present work aims to understand and quantify the grain-size effects on LST rates based on a tracer experiment performed at a headland-bay beach located at the western Portuguese coast - Grande beach (Fig. 1). This beach extends for about 1 km with a NE-SW orientation; it is exposed to a NW dominant wave regime and to a semi-diurnal mesotidal regime.

## 2. METHODS

### 2.1. Tracer experiment method and LST rate

The tracer experiment was based on the continuous injection method – CIM (Duane and James, 1980). This method involves the injection of a known quantity of tracer at a given position, at a constant rate, over a given interval for sufficient time to allow stabilization of the tracer flux rate downdrift, measured at one or more locations.

The application of the principle of tracer mass conservation, assuming that steady state can be reached, yields that the rate at which the tracer is introduced into the transport system equals the rate that tracer leaves the transport system. Thus, longshore sediment transport ( $Q$ ) can be given by:

$$Q = \frac{q}{\bar{c}_{eq}}$$

where  $\bar{c}_{eq}$  is the steady state or equilibrium concentration measured at a point downdrift of the injection site and  $q$  is the volumetric tracer injection rate, which can be deduced from the tracer dry mass injection rate ( $q_{dm}$ ) using the equation:

$$q = \frac{q_{dm}}{(1-p)\rho_s}$$

where  $\rho_s$  is the quartz density and  $p$  the sand porosity (assumed as 0.4).

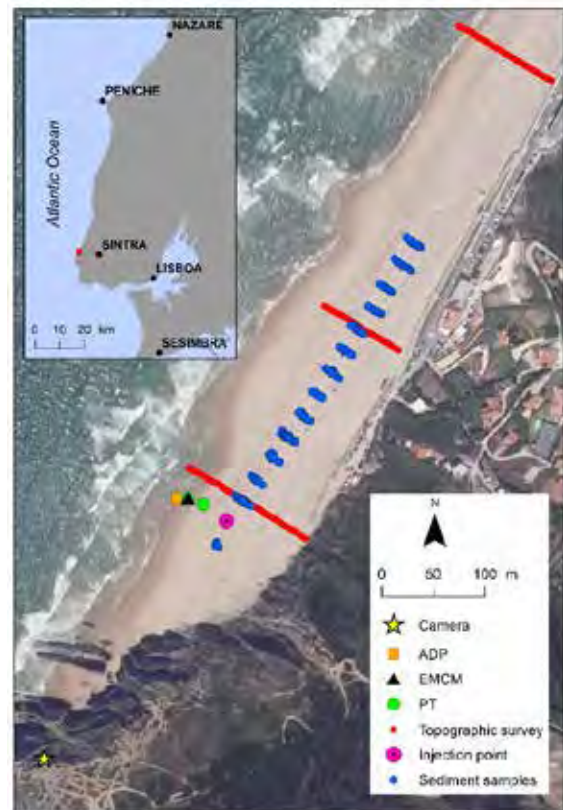


Fig. 1. Study site with location of oceanographic instruments (ADP - Acoustic Doppler Profiler, EMCM - Electromagnetic Current Meter, PT - Pressure Transducers); video camera; topographic surveys; tracer injection point and sediment sampling.

## 2.2. Tracer preparation

The sediment used in the tracer experiment was non-native of the Grande beach. The mean grain-size of the tracer samples range between  $-0.06 \phi$  and  $0.44 \phi$ . This sediment was characterized by a wide grain-size range, ideal to support the study of selective transport processes. On the other hand, it also included the grain-size range of Grande beach sediment (Fig. 2).

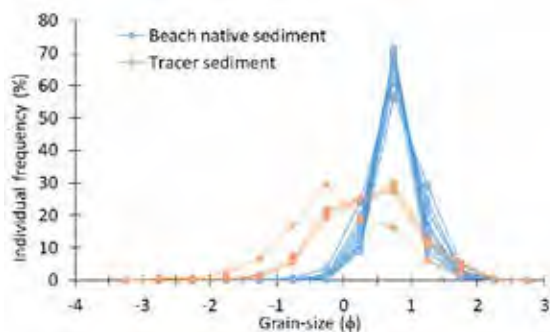


Fig. 2. Grain-size distribution of a sample set collected at Grande beach during the experiment and a sample set of the tracer sediment. Grain-size analysis was performed in laboratory using a sieving method.

The sediment tagging process included sediment washing, drying and painting (see details in Ribeiro, 2017).

## 2.3. Tracer experiment

The tracer experiment was performed at 8<sup>th</sup> September 2014. At the time, Grande beach presented a well-developed berm, a steep beach face and a low-gradient tide terrace. Thus, experiment was performed near high-tide. This scheduling aimed to minimize water level variation in order to get, as much as possible, stationary conditions. Experiment settings also benefited from a narrow surf zone with plunging waves at the beach face, avoiding therefore the dispersion of the tracer on the low-tide terrace by waves and by rip currents, which are more active during lower tide levels.

About 1.7 tons of tracer were injected at the lower limit of the swash zone, at a  $16 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$  rate ( $q_{dm}$ ), during 1 hour and 46 minutes. Superficial sediment samples with  $\approx 1 \text{ cm}$  thickness were collected along 13 downdrift cross-shore profiles spaced by 25 m from the injection site. Sediment sampling was also performed along one updrift cross-shore profile, located 25 m from the injection site (Fig. 1). Sampling began 10 minutes after the beginning of tracer injection and extended for about 1 hour and 10 minutes after the injection end. Each sediment sampling cycle on over all profiles lasted about 20 to 30 minutes, but due to the limited number of persons, it was not performed synchronously.

Beach morphology was monitored with a DGPS-RTK and oceanographic conditions were monitored with a video camera, floaters (oranges) and the oceanographic instruments presented in Fig.1. The

acquisition settings and details of the data processing and analysis are described in Ribeiro (2017).

## 2.4. Data processing and analysis

Sediment samples were washed with freshwater and dried. Afterwards, each sample was well mixed and spread on black boards, in a way that the sediment completely covered the board. Each board were photographed with a digital camera under white and ultraviolet light.

Tracer particles detection and counting were done by image analysis using the *SedPhoto2*, a MATLAB toolbox created for this propose, available at <http://beachtocanyon.rd.ciencias.ulisboa.pt/>.

Tracer dilution was obtained through the relative area occupied by the tracer particles in the images, and subsequently converted into mass dilutions using a calibration curve. The relation between the relative area dilutions ( $D_r$ ) and the standard mass dilutions ( $D_m$ ) obtained by a least square linear fitting through the origin (Fig. 3).

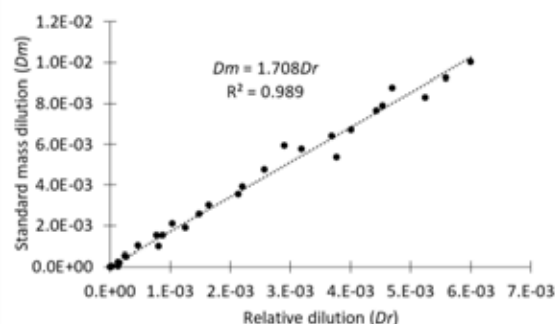


Fig. 3. Relation between standard mass dilution ( $D_m$ ) obtained from controlled masses of tracer and relative area dilution ( $D_r$ ) obtained from the image analysis.

Based on the area of the tracer particles computed by the image analysis, it was also possible to perform a grain-size analysis, assuming an equivalent spherical diameter. Tracer particles were grouped in  $1 \phi$  classes and the frequency of each class estimated, as well as mean grain-size of each sample.

## 3. RESULTS

### 3.1. Morphological and oceanographic conditions

During the experiment, Grande beach presented a well-developed berm, a steep beach face ( $\tan\beta = 0.12$ ) and a low-gradient tide terrace ( $\tan\beta = 0.03$ ). The tidal range was about 1.2 m and incident waves presented an average significant wave height of 0.7 m and average zero-crossing wave period of 6 s. Video images showed a crossed sea state, with waves were coming from both W and NW directions. Estimate of a representative incident wave angle at the breaking was therefore problematic. EMCM and ADP data show that when the waves were breaking on top of the sensors, mean current was clearly directly northward

and had a magnitude between 0.42 and 0.64  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The mean longshore current measured with floaters at the breaker zone was higher (0.79  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). This value is affected by the higher speeds (up to 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) measured at the end of the experiment, probably generated by an afternoon sea breeze.

### 3.2. Tracer grain-size

Size estimates (by image analysis) of tracer particles in sediment samples collected in the experiment show three main grain-size modes: very coarse sand ( $-1\phi$  to  $0\phi$ ), coarse sand ( $0\phi$  to  $1\phi$ ) and medium sand ( $1\phi$  to  $2\phi$ ) (Fig. 4). Particles smaller than  $3\phi$  were also detected, that, according to the previous laboratory grain-size analysis (Fig. 2), had null percentages in the sediment used to trace. The grain-size underestimation is probably caused by particle overlapping when sediment samples are spread on boards, prior to the image analysis process.

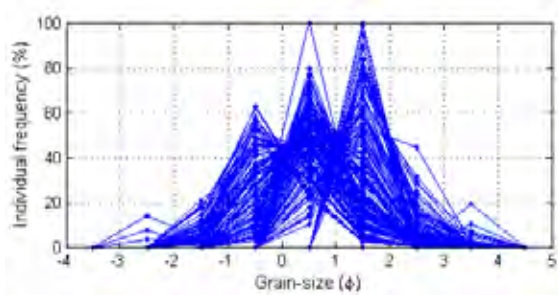


Fig. 4. Grain-size distributions of tracer particles detected in sediment samples.

The spatial distribution of the tracer particles show that mean grain-size decreased with the longshore distance to the injection point (Fig. 5A). In the cross-shore direction, the mean grain-size decreasing occurred from the lower to higher elevations, correspondingly from lower beach face to upper beach face (Fig. 5B).

### 3.1. Tracer dilution

Results presented in Fig. 6 show that updrift of the injection site (-25 m), tracer concentrations were null; while downdrift, as expected, concentration decreased with the distance. The exception is the medium gravel, which has a small significance and did not show any distribution pattern.

Up to 50 m downdrift, tracer concentration show large variations along the sampling profiles and an abrupt decreasing in a short time after the tracer injection ended, mainly for coarser particles, suggesting that at these distances tracer was not completely mixed within the active beach transport system.

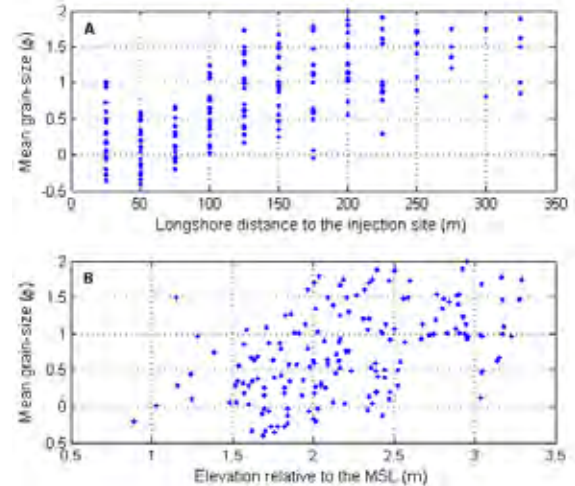


Fig. 5. (A) Relationship between mean tracer grain-size and longshore distance from the injection site; and (B) relationship between mean tracer grain-size and sample elevation relative to mean sea-level (MSL).

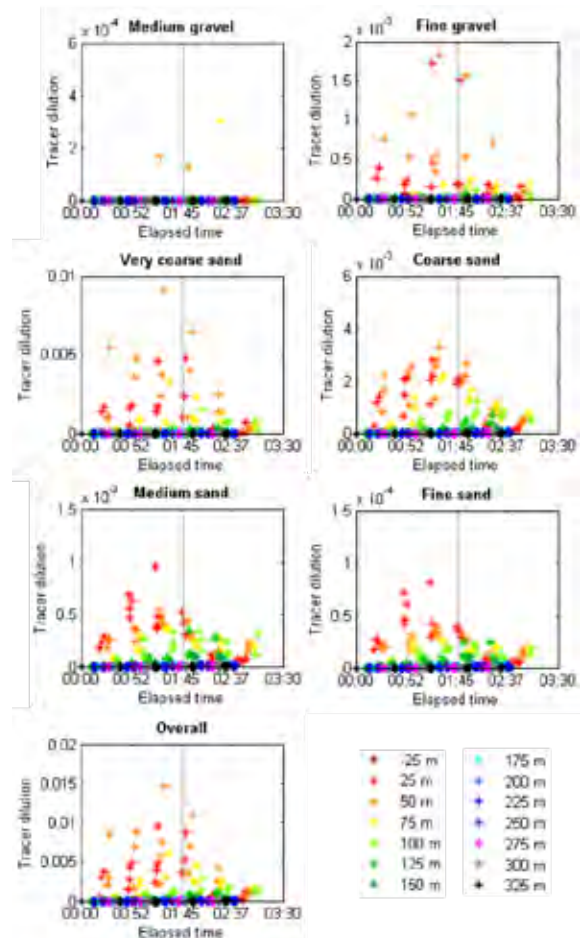


Fig. 6. Tracer dilution at different distances (colours) from the injection point, for the overall tracer sediment and by grain-size intervals. The grey line is the end of the tracer injection.

Between 75 and 100 m downdrift, it is possible to observe an increase in the concentration followed by more constant values. This is particularly evident for the finer particles (medium and fine sand), which seems to reach the steady state. In the case of coarser



particles, as well as in the case where overall tracer particles the steady state condition is not so evident. For distances greater than 100 m, concentration increased slower, mainly for coarse sediments, and steady state was not reached.

#### 4. DISCUSSION

The results show a grain-size sorting of the tracer particles across and alongshore (Fig. 5). It was observed that coarser particles tend to concentrate at the lower beach face, while the finer ones are transported up to the upper beach face. This observation is in agreement with previous works, which have been shown that sediment grain-size is generally coarser within the wave plunge point at the base of the beach face, decreasing both up to the foreshore slope and towards offshore, sometime with a second sediment coarsening at the offshore bar (e.g. Komar, 1998). On the other hand, decrease of mean tracer grain-size with longshore distance to the injection point suggest that advection velocity increase from coarser to finer particles, which can be explained by the fact that finer particles remain longer in suspension and thus travel farther. This assumption is also supported by the model presented by Ribeiro (2017), where an analytical solution of advection-diffusion equation was used to simulate the tracer dilutions presented in Fig. 6. The results showed that tracer advection velocity and diffusion used to fit the model increase from very coarse to fine sand particles (Table I). Modelling of gravel particles gave inconsistent results.

Table I. Steady state concentration ( $\bar{c}_{eq}$ ); advection velocity ( $v_a$ ); diffusion coefficient ( $D$ ) (in Ribeiro, 2017).

Grain-size	$\bar{c}_{eq} \times 10^{-3}$	$v_a \times 10^{-2}$ (m.s <sup>-1</sup> )	$D \times 10^{-2}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
Very coarse sand	1	1.61	1.33
Coarse sand	1	1.76	4.63
Medium sand	0.225	1.92	5.04
Fine sand	0.0175	1.97	6.62
Overall particles	2.3	1.72	4.18

As was not possible to assure equilibrium conditions (because injection time was relatively short), relative transport rates were deduced from tracer velocity as the cross-sectional area of the sediment transport is equal for all grain-sizes.

Relative LST of each grain-size (in relation to overall tracer sediment) is represented in Fig. 7, showing the increase of the transport rates from coarser to finer particles.

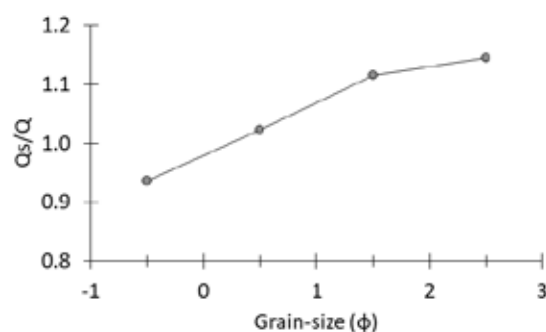


Fig. 7. Relation between grain-size and relative longshore transport rates ( $Q$  is the transport rate obtained considering overall tracer sediment and  $Q_s$  is the transport rate of each grain-size class).

#### 5. CONCLUSIONS

A sediment tracer experiment using the continuous injection method was used to estimate the grain-size dependency of longshore drift. Results show the transport rate decreases with the increase of grain-size, a result in agreement with previous works (e.g. Komar, 1988; del Valle *et al.*, 1993).

#### Acknowledgements

This work was supported by a PhD grant (SFRH/BD/79126/2011) and the project Beach to Canyon (PTDC/MAR/114674/2009), both funded by Fundação para a Ciência e Tecnologia.

#### REFERENCES

- del Valle, R., Medina, R., Losada, M. (1993). Dependence of coefficient K on grain size. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119: 568-574.
- Duane, D.B. and James, W.R. (1980). Littoral transport in the surf zone elucidated by an Eulerian sediment tracer experiment. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50(3): 929-942.
- Komar, P.D. (1988). Environmental controls on littoral sand transport. *Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering*, 1238-1252, ASCE.
- Komar, P.D. (1998). *Beach processes and sedimentation*. 2<sup>nd</sup> edition. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 554 p.
- Ribeiro (2017). *Headland sediment bypassing processes*. PhD thesis, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 210 p. Available at: <http://hdl.handle.net/10451/30262>

## Modelling of a dredging scenario under winter wave climate for Figueira da Foz coastal system (W Portugal)

S. Fernández-Fernández (1), C. Ferreira (1), P.A. Silva (1), P. Baptista (2), C. Coelho (3), S. Romão (1,4), A. Fontán-Bouzas (1,5), C. Bernardes (2), T. Abreu (6)

- (1) Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Dep. de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. [sandrafernandez@ua.pt](mailto:sandrafernandez@ua.pt)
- (2) Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Dep. de Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- (3) Riscos e Sustentabilidade na CONstrução (RISCO), Dep. de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- (4) Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- (5) GEología Marina y Ambiental (GEOMA), Dep. de Geociencias, Universidad de Vigo, Vigo, España.
- (6) Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Dep. de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP-IPP), Porto, Portugal.

**Abstract:** Figueira da Foz jettied estuary-inlet undergoes important morphological changes in response to the high energetic wave climate of the North Atlantic Ocean. These changes generate shoaling problems at the inlet due to the formation of a submerged sandbar. Therefore, harbor administration normally performs coastal dredging operations to guarantee navigation. The goal of this study is to evaluate the efficiency of a sedimentation basin built updrift of the inlet. Delft3D model simulates morphological evolution under winter wave climate both for dredging scenario, representing the sedimentation basin, and reference scenario (*i.e.* no-dredging operation). The bed level differences between the numerical solutions and the sedimentation basin infill are analysed over time. The results highlight main morphological changes after storm events and that the sediment basin infilling tends to decrease accretion rates at the inlet. These findings underscore the life dependency of the sedimentation basin on the wave climate conditions to support stakeholders' decisions.

**Key words:** tidal inlet, morphodynamic, storm events, Delft3D, coastal management

### 1. INTRODUCTION

Figueira da Foz coastal region is located in the Portuguese west coast on the southern side of Cape Mondego (Fig. 1). From north to south, this coastal system is characterized by a wide sandy anthropized at the north of the Mondego estuary-inlet mouth, which is bounded by two jetties, and by groined narrow sandy beaches at the south of the estuary-inlet.

The high energetic wave climate of the North Atlantic Ocean, recording significant wave heights ( $H_s$ ) higher than 3 m (22 % of time) (Costa *et al.*, 2001), drives a net southward longshore transport of  $1.1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year (Santos *et al.*, 2014).

The inlet undergoes morphological changes that entails shoaling problems. These are due to the formation of a submerse sandbar at the inlet mouth

(7-8 m, mean sea level, MSL) that endangers navigation. In fact, between 2012 and 2016, the navigation towards local harbor was conditioned for vessels with length lower than 11 m during 100 days/year and interdicted during 19 days/year (Palhas-Ezequiel *et al.*, 2016). Hence, local harbor administration normally performs maintenance coastal dredging operations (*e.g.*, eight operations performed from winter of 2014/15 to winter 2016/17). One of the strategies to prevent shoaling at the inlet mouth consists in building a sedimentation basin updrift of the inlet mouth designed to admit the net longshore sediment transport.

The goal of this study is to evaluate the efficiency of a sedimentation basin built updrift of the inlet considering representative conditions of winter wave climate.

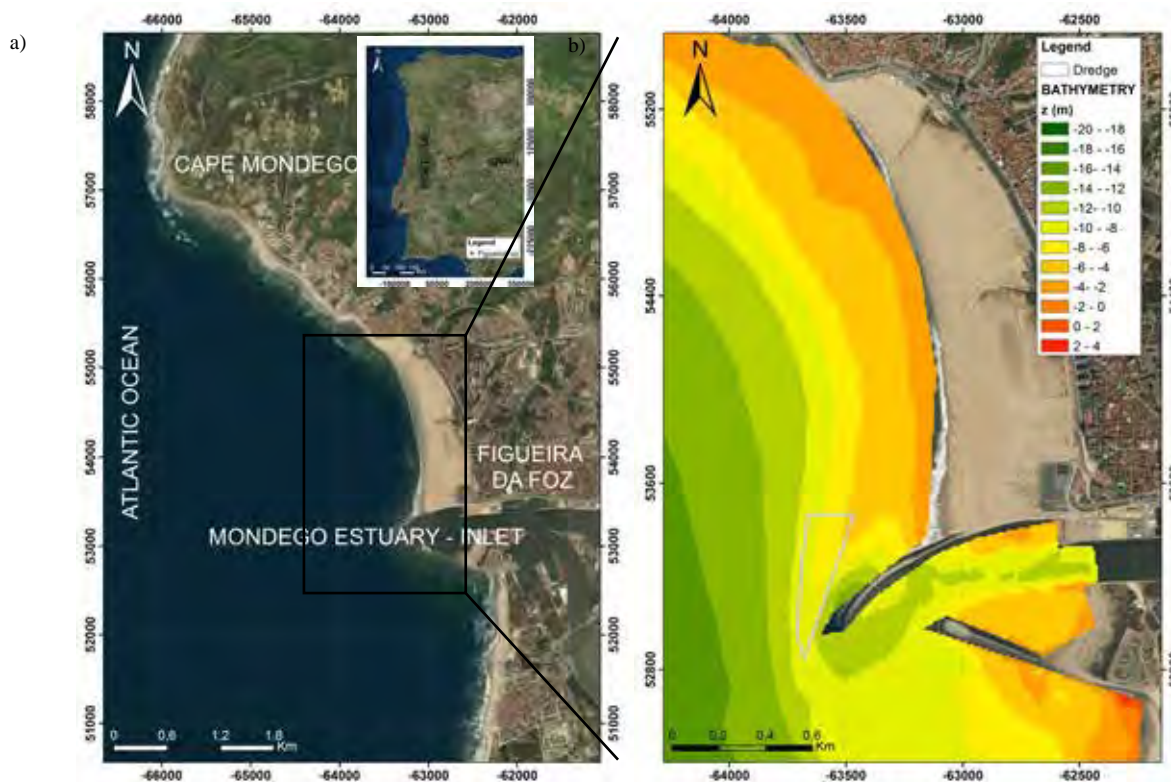


Fig. 1. Map of study area (a) and detailed map of Figueira da Foz (Portugal) including numerical initial bathymetry referenced to MSL and area to sedimentation basin (polygon) (b)

## 2. METHODOLOGY

Delft3D model suite (FLOW, WAVE and MOR modules), which was previously calibrated, validated and optimized for Figueira da Foz coastal region (details can be found in Ferreira *et al.*, 2017), was used to simulate the morphological evolution of the inlet and adjacent areas. The model settings considered were proposed by Ferreira *et al.* (2017), *i.e.*: Van Rijn (Van Rijn *et al.*, 2004) sediment transport equation, optimized sediment transport parameters ( $a_{bn}=25$  and  $a_{bs}=0.5$ ), variable distribution of sediment grain size and bed sediment thickness. The numerical bathymetry was built from European Marine Observation and Data Network (EMODnet) data and local bathymetric surveys (Ferreira *et al.*, 2017).

The designed scenarios included a reference scenario, which considers the bathymetry depicted in Fig. 1b, and a dredging scenario with a sedimentation basin as represented by the polygon in Fig. 1b. This sedimentation basin has a depth of 10 m referenced to mean sea level. The extracted sediment volume reaches  $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ , which is similar to the volume usually dredged in each operation (*e.g.*, Romão *et al.*, 2018).

The input spectral wave forcing was generated from a wave hindcast based on the WWIII model (Bertin *et al.*, 2013). The selected dataset corresponds to the first three months of 2007, a representative regional winter wave climate (Fig. 2). Seven storms were

identified according to Pinto *et al.*'s criteria (2014) (*i.e.*  $H_s > 4 \text{ m}$  and duration  $> 12$  hours) with durations ranged from 23 to 56 hours, maximum values of significant wave height ( $H_{smax}$ ) between 4.6 and 7.0 m and power storm index (PSI) (Dolan and Davies, 1994) from 480 to 2597  $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ .

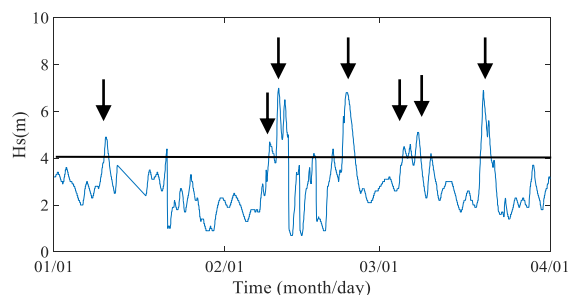


Fig. 2. Significant wave height temporal series - 2007. The arrows identify the storms.

## 3. RESULTS

The simulations results highlighted the existence of areas with sediment accretion (*i.e.* positive bed level values) or erosion (*i.e.* negative bed level values) in response to propagated wave climate conditions. Fig. 3 shows the predicted bed level differences after three months' simulation for both scenarios.

The erosion and accretion sediment patterns were similar in the north of Figueira da Foz Beach and south of the jetties. In the reference simulation, the accretion near the northern jetty and inlet was higher and extended on a larger area than in the dredged

scenario, suggesting that the sedimentation basin

prevented the southern propagation of the sandbar.

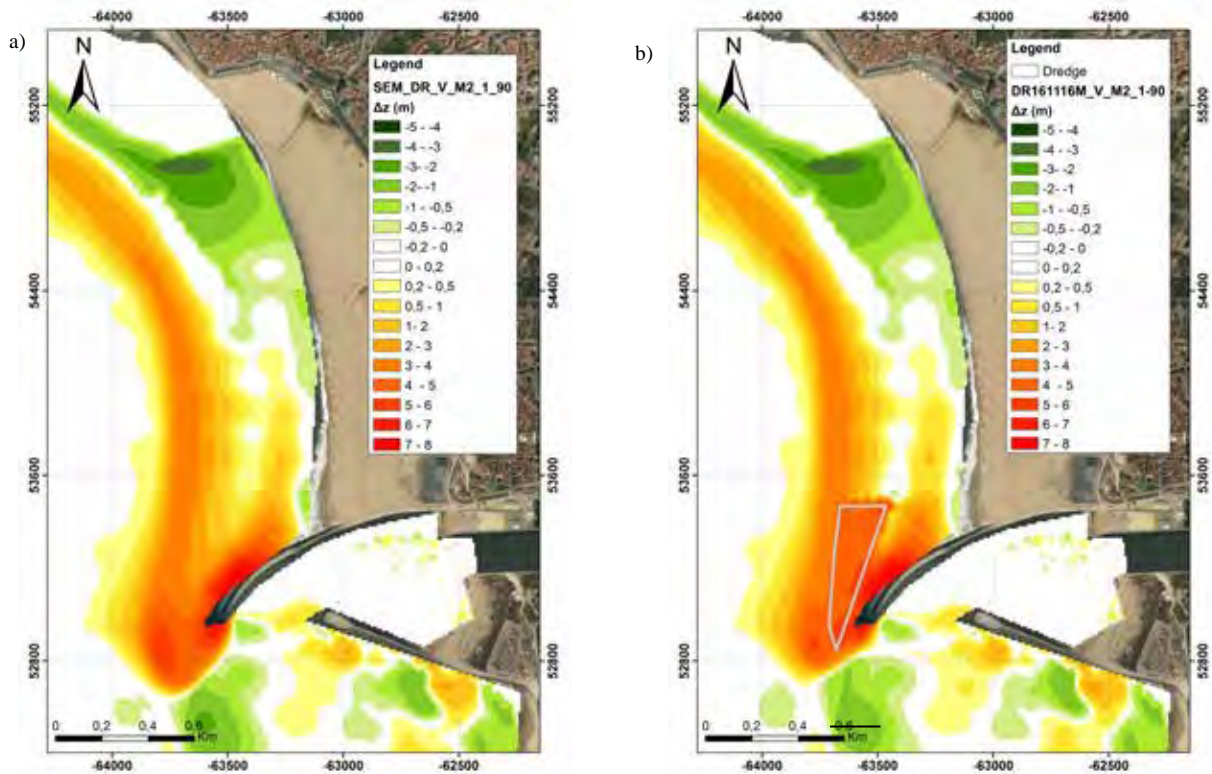


Fig. 3. Predicted bed level differences between day 1 and day 90 to: a) reference scenario and b) dredge scenario.

The estimated infill rate of the basin area for each fortnight is presented in Table I.

Table I. Infill rate of the basin area, number of storms,  $H_{smax}$  of storms, and  $PSI$  accumulated to each fortnight.

Days	Infill rate (%)	Storm events	$H_{smax}$ (m)	$PSI$ ( $m^2 \cdot h$ )
<b>1-15</b>	11	1	4.9	480
<b>15-30</b>	20	0	-	0
<b>30-45</b>	52	2	7.0	3105
<b>45-60</b>	76	1	6.8	2589
<b>60-75</b>	92	2	5.1	1518
<b>75-90</b>	101	1	6.9	2238

The infill rate was low during the first and second fortnight when only a storm event was registered ( $H_{smax}=4.9$  m and  $PSI=480$   $m^2 \cdot h$ ). It increased considerably between the third and fourth fortnight (*i.e.* days 30-60) coinciding with the most energetic storm events ( $H_{smax}=7$  m and  $PSI=2597$   $m^2 \cdot h$ ; and  $H_{smax}=6.8$  m and  $PSI=2589$   $m^2 \cdot h$ ). The basin area was completely filled during the last fortnight (*i.e.* days 75-90) when other energetic storm occurred ( $H_{smax}=6.9$  m and  $PSI=2238$   $m^2 \cdot h$ ).

#### 4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The differences between reference and dredge scenario underscored that sedimentation basin retains sediment.

Under the studied winter climate conditions, the proposed sedimentation basin supported six storm events (four of class I and two of class III according to Dolan and Davies' classification, 1994) corresponding with a  $PSI$  accumulated of 7692  $m^2 \cdot h$  before its infill. This entailed a basin life of 75 days, which represented almost the half of this winter wave climate. Nevertheless, the basin infill rate was not constant along time because the high energetic events enhanced more sediment accretion in dredge area. Consequently, if the winter wave climate was extreme (*i.e.*, high number and intensity of storms), it would be expected a shorter lifetime for the sedimentation basin.

This research constitutes the basis for the design of future dredging scenarios considering higher dredged sediment volume and undergoing to other wave climate conditions (*e.g.*, extreme winters). This will help to go one-step further in the seeking of effective dredging scenarios for Figueira da Foz coastal region.

#### Acknowledgements

The authors gratefully acknowledged Xavier Bertin for providing the spectral wave forcing. Thanks are due for the financial support to APFF, SA - Figueira

da Foz Port Administration in the framework of the project: "Elaboration of the study of dredging and dumping scenarios at the mouth of the Figueira da Foz Harbour", to CESAM (UID/AMB/50017 - POCI-01-0145-FEDER-007638), to FCT/MCTES through national funds (PIDDAC), and the co-funding by the FEDER, within the PT2020 Partnership Agreement and Compete 2020. C.F., S.R. and A.F.-B. are awarded a Fellowships (PD/BD/127993/2016, SFRH/BD/129079/2017 and ED481B2016/141-0, respectively) by Portuguese Foundation for Science and Technology and Galician Government.

## REFERENCES

- Bertin, X., Prouteau, E., and Letetrel, C. (2013). A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change*, 106, 77-83. doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.03.009.
- Costa, M., Silva, R., and Vitorino, J. (2001). Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária*. Associação Nacional de Navegação. Sines, Portugal, 1-20.
- Dolan, R., and Davies, R.E. (1994). Coastal storm hazards. *Journal of Coastal Research*, 12, 103–114.
- Ferreira, C., Silva, P.A., Fernández-Fernández, S., Ribeiro, A.S., Abreu, T., Bertin, X., and Dias, J.M.D. 2017. Validation of a morphodynamic model to Figueira da Foz inlet. In: Losada, I.J.; Lara, J.L.; Tomasichio, G.R.; D'Alessandro, F. (eds.), *Proceedings of International Short Course and Conference on Applied Coastal Research (SCACR)*, Santander, España, 1-12.
- Palhas Ezequiel, T.M.; Carvalheda, D.; Silva, N.; Rocha, S.; Ataíde, J.; Carvalho, A.; Silva, G.; Leal, L.; Vieira, G.; Nogueira, V.; Ruas, V.; Festas, J.; Lé, A.; Branco, I.; Silva, C. (2016). Relatório do Grupo de Trabalho Segurança e Navegabilidade da Barra do Porto da Figueira da Foz 94 pp.
- Pinto, J., Mota, P., and Costa, M. (2014). Evolução da climatologia de agitação marítima em Portugal Continental. *Atas das 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa, Portugal, 195-198.
- Romão, S., Silva, P. A, Baptista, P., Fontán-Bouzas, A., Fernández-Fernández, S., Ferreira, C., Bernardes, C., Coelho, C., Garrido, C., and Rua, J. (2018) Efeito da agitação marítima na morfologia de uma embocadura sujeita a dragagens. In: Coelho, C; Silva, P.A.; Pinheiro, L.M.; Gonçalves, D.S. (eds.), *Dragagens: Questões Ambientais e Monitorização*. UA Editora, 204 pp.
- Santos, F.D., Lopes, A.M., Moniz, G. Ramos, L., Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira: o desafio da mudança. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, 154 pp.
- Van Rijn, L., Walstra, D. R., and v. Ormondt, M, (2004). Description of TRANSPOR2004 and implementation in Delft3D-ONLINE. Tech. Rep. Z3748.10, WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 69, 85, 237, 239.

# Impactos da depressão *Emma* no litoral da região de Lisboa

A. Ferreira (1), A. Bastos (1, 2), A. Nobre Silva (1, 2), R. Taborda (1, 2) e C. Andrade (1, 2)

(1) Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. [andrea\\_mmf@hotmail.com](mailto:andrea_mmf@hotmail.com)

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

**Resumo:** A passagem da depressão *Emma* (28 de fevereiro - 1 de março de 2018) afetou os segmentos litorais da região de Lisboa mais expostos a sul e sudoeste. A agitação marítima associada gerou impactos diferentes em contextos geomorfológicos distintos, que foram caracterizados através da medição da agitação marítima costeira e do alcance horizontal e vertical do espraio das ondas, fatores representativos do potencial de forçamento oceanográfico em condições de tempestade. Nos troços litorais de Oeiras e Cascais, mais artificializados, observou-se rebaixamento de praias e galgamento de troços do passeio marítimo, estrada marginal e via-férrea. Na praia de São João da Caparica, confinante com um edifício dunar, observou-se escarpamento e galgamento da duna frontal. Os resultados apresentados permitirão calibrar e validar modelos de galgamento, em contextos geomorfológicos diferenciados.

**Palavras-chave:** Galgamento, Inundação, *Emma*, Agitação marítima, Erosão e Praias.

## 1. INTRODUÇÃO

Entre 28 de fevereiro e 5 de março de 2018 o litoral português foi assolado por ventos moderados a fortes e agitação marítima de oés-sudoeste. Estas condições decorreram da passagem de vários sistemas depressionários formados no Atlântico Norte.

O litoral da região de Lisboa foi muito afetado, por se encontrar particularmente exposto à agitação de sudoeste e pela coincidência entre as condições de tempestade marítima e de marés vivas. Acresce ainda, que a duração e o número de tempestades foram anormalmente elevados. Deste conjunto de sistemas depressionários destaca-se a depressão *Emma*, que passou ao largo da região de Lisboa na madrugada de 1 de março, originando o registo de um mínimo de pressão de 980 mbar no marégrafo de Cascais.

Neste trabalho descrevem-se os impactos da agitação marítima associada à passagem desta depressão (*Emma*) no litoral da região de Lisboa, em diversos contextos geomorfológicos (litoral arenoso, rochoso e artificializado) através de medições de agitação e de alcance horizontal e vertical das ondas. Para este efeito foi monitorizado o litoral do concelho de Oeiras, a praia de São Pedro do Estoril (concelho de Cascais), e a praia de São João da Caparica (concelho de Almada), Fig. 1.



Fig. 1. Praias e troços costeiros monitorizados.

## 2. LITORAIS ESTUDADOS

### 2.1. Oeiras

A zona costeira de Oeiras estende-se por cerca de 12 km e exhibe elevada diversidade geológica, morfológica e de ocupação. O litoral é dominado por arribas baixas, geralmente intervencionadas, onde se encaixam algumas praias de areia. Estes areais acumulam-se em indentações de erosão diferencial, fozes de ribeiras e ainda em estruturas artificiais de proteção (molhes e esporões).

Para caracterizar a zona costeira de Oeiras, classificaram-se os conteúdos do leito e da margem (faixas adjacentes à LMPMAVE<sup>1</sup> para o lado do mar e de terra, respetivamente). O leito encontra-se muito intervencionado, mas os sistemas naturais (praia de areia e plataforma rochosa) correspondem ainda a cerca de metade do seu comprimento. A margem apresenta-se quase totalmente (97 %) artificializada, maioritariamente devido às redes viária e ferroviária e, mais recentemente, ao passeio marítimo. A linha de costa encontra-se assim fixada, sem capacidade de resposta natural, adaptativa, ao forçamento meteo-oceanográfico.

### 2.2. São Pedro do Estoril

A praia de São Pedro do Estoril (SPE) localiza-se a nascente de Cascais e constitui uma pequena praia arenosa em baía (≈ 300 m) com orientação aproximada NW-SE que se desenvolve sobre uma plataforma rochosa carsificada, sub-horizontal, descoberta em baixa-mar. Esta praia encontra-se limitada a poente pelo promontório da Ponta do Sal, e a norte e a nascente por estruturas artificiais.

### 2.3. São João da Caparica

<sup>1</sup> LMPMAVE – Linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais.

A praia de São João da Caparica (SJC) localiza-se no extremo norte do arco litoral Caparica-Espichel. É uma praia de areia limitada por estruturas artificiais (longitudinais e transversais, Veloso-Gomes *et al.*, 2006) e por um edifício dunar recentemente restaurado no âmbito do projeto ReDuna (CMA, 2018). A praia tem cerca de 1.4 km de comprimento e é limitada pelo esporão sul da Cova do Vapor (EV1) e pelo esporão norte da Costa da Caparica (EC7). O limite terrestre faz-se, de norte para sul, por uma duna frontal que a separa de uma planície litoral extensa e vegetada, a que sucede uma defesa aderente ( $\approx 400$  m) que protege o parque de campismo INATEL. A duna é constituída por um edifício mais antigo com cota máxima de 10 m (sendo as cotas modais da crista 7 a 8 m); apresenta 1 km de comprimento e largura variável entre 25 e 80 m. Em consequência do projeto ReDuna formou-se recentemente um novo cordão dunar que encosta ao edifício antigo através de uma ligeira depressão.

Durante episódios de tempestade, a duna e a defesa aderente são frequentemente tocadas pelas ondas e ocasionalmente galgadas.

### 3. CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS E METEOROLÓGICAS REGIONAIS

Os registos das boias ondógrafo do Instituto Hidrográfico (Tabela I) entre 28/02 e 05/03<sup>2</sup>, mostram um aumento de altura significativa de norte para sul, com valores máximos observados na boia de Faro (6.62 m). (Tabela II).

Tabela I. Agitação marítima entre 28/02 e 05/03/2018 (dados disponibilizados pelo IH). Hs (altura significativa); Tm (período médio); Dir (direção)

Boias	Hs (m)			Tm (s)			Dir main
	mean	Max.	$\sigma$	mean	Max.	$\sigma$	
Leixões	3.05	5.08	0.58	7.1	10.0	0.79	WSW
Monican M01	3.73	5.02	0.53	7.4	9.0	0.62	WSW
Faro	3.80	6.62	0.82	7.5	10.2	0.79	WSW

Tabela II. Agitação marítima no dia 01/03/2018 (dados disponibilizados pelo IH). Hs (altura significativa); Tm (período médio); Dir (direção)

Boias	Hs (m)			Tm (s)			Dir main
	mean	Max.	$\sigma$	mean	Max.	$\sigma$	
Leixões	2.86	4.21	0.34	6.8	7.9	0.44	WSW
Monican M01	3.97	4.89	0.43	7.6	8.8	0.52	SW
Faro	5.05	6.62	0.60	8.3	10.2	0.60	SW

A agitação de tempestade coincidiu com marés vivas, tendo sido registado no marégrafo de Cascais um máximo de 2.14 m (NMM), na madrugada do dia 01/03, a que corresponde aproximadamente + 0.5 m de sobrelevação meteorológica.

### 4. MONITORIZAÇÃO

A monitorização dos efeitos da tempestade *Emma* foi específica para cada local de estudo. Os levantamentos topográficos foram realizados com equipamento GPS-RTK (*Global Positioning System – Real Time Kinematic*) e comparados com dados topográficos adquiridos em campanhas anteriores.

#### 4.1. Oeiras

A monitorização no litoral de Oeiras incluiu: (1) medição das características das ondas (altura e período) com a instalação de dois transdutores de pressão (PT), a 01/03: um PT perto da piscina oceânica frente ao INATEL e outro junto à praia das Fontainhas (Fig. 2); (2) levantamento topográfico de perfis longitudinais no coroamento da estrutura de proteção da praia Velha (Paço de Arcos) e no passeio marítimo que ladeia a praia de Santo Amaro de Oeiras, para registar o alcance vertical do espraio das ondas que induziram galgamento, a 01/03; (3) levantamento topográfico de dois perfis transversais na praia de Santo Amaro em 01/03; (4) medição das cotas atingidas por 100 espraos consecutivos, na estofa de preia-mar (PM), também durante o dia 01/03, na mesma praia; e (5) Compilação de ocorrências reportadas pelos *media* entre 28/02 e 05/03 relativas ao impactos deste evento no concelho de Oeiras.

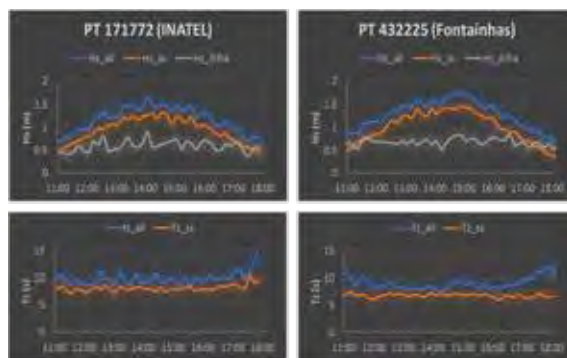


Fig. 2. Variação da altura significativa e período de onda nos locais monitorizados pelos PTs (01/03/2018). Os equipamentos encontravam-se na zona intertidal, sendo visível a resposta dos dados à variação da maré, bem como a rebentação das ondas. (Legenda: Hs-altura significativa, Tz – período médio de zero ascendente, all – todas as frequências, ss – ondas de vento [0.05Hz a 0.5Hz], infra – ondas infragravíticas [0.004Hz a 0.05Hz]).

#### 4.2. São Pedro do Estoril

Os efeitos deste temporal na praia de SPE foram avaliados através de: (1) registo fotográfico, no dia do temporal 01/03, cerca de 30 minutos após a preia-mar; (2) levantamento topográfico da praia, do limite entre a areia e a plataforma rochosa e de um perfil transversal, a 08/03/18 após a passagem da depressão *Emma*.

#### 4.3. São João da Caparica

Os trabalhos de campo na praia de São João da Caparica incluíram: (1) registo fotográfico de ocorrências, nos dias 04/03 e 06/03; e (2) levantamento topográfico da praia (06/03) e duna (07/03), incluindo perfis transversais e linhas notáveis (*e.g.*, base da duna/estrutura).

## 5. IMPACTOS

### 5.1. Oeiras

<sup>2</sup> Dados cedidos pelo Instituto Hidrográfico.

No litoral de Oeiras registaram-se numerosos galgamentos de estruturas costeiras, com principal incidência em Paço de Arcos, assim como de toda a extensão do passeio marítimo, com interdição de circulação de pessoas. Houve também corte sistemático da circulação rodoviária na EN6 (estrada marginal) em todas as preia-mares, entre 28/02 e 05/03. Em alguns locais os galgamentos oceânicos provocaram o transporte de detritos para as vias, pedonal e rodoviária; houve arrancamento de lajetas do pavimento junto ao centro Náutico de Paço de Arcos (Fig. 3), estragos no murete de alvenaria junto à Estação de Socorros a Náufragos – Patrão Lopes e estragos nos barcos de pesca artesanal de Paço de Arcos. A cota de galgamento máxima registada foi 5.5 m, junto ao Forte de Nossa Senhora de Porto Salvo. Na praia de Santo Amaro de Oeiras, o máximo espraio, medido na preia-mar diurna do dia 01/03, alcançou a cota de 4.5 m. Do levantamento de ocorrências efetuado, totalizaram-se 25 ocorrências devidas à agitação marítima entre os dias 28/02 e 05/03.



Fig. 3. Galgamento oceânico e destroços no passeio em Paço de Arcos no dia 01/03/2018.

Na zona da Cruz Quebrada, parte da vedação de proteção da via ferroviária foi destruída devido a eventos de galgamento. Também foram registadas, por duas vezes, inundações de origem oceânica na Av. Ferreira Godinho, Cruz Quebrada (Fig. 4).



Fig. 4. Inundação de origem oceânica na Av. Ferreira Godinho, Cruz Quebrada, no dia 02/03/2018.

### 5.2. São Pedro do Estoril

O temporal *Emma* teve impacto significativo na praia de SPE (Fig. 5), com exposição generalizada do substrato rochoso, especialmente no sector nascente onde a exposição de rocha se verificou ao longo de todo o perfil transversal.

A comparação dos levantamentos topográficos de março (pós-tempestade) com outros adquiridos em

campanhas anteriores, mostra que a resposta morfológica se caracterizou por rebaixamento do areal, diminuição de declive e pela transferência de sedimentos do setor nascente para o sector poente da baía. De modo geral, o limite areia/plataforma rochosa deslocou-se em direção ao mar (especialmente a poente) enquanto a extremidade nascente da praia, que em condições normais apresenta uma largura média de 30 a 50 m, ficou totalmente desnudada (Fig. 6).

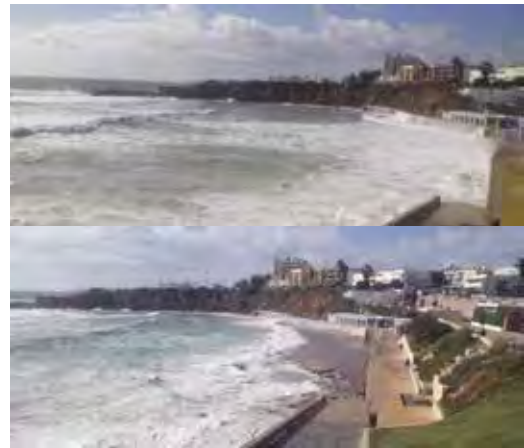


Fig. 5. SPE no dia 01/03/2018, cerca de 30 min. após a preia-mar (perspetiva para NW): em cima, galgamento da defesa aderente da praia (cota  $\approx$  6.2 m); em baixo, evidências de exposição do substrato rochoso em todo o sector nascente da praia.

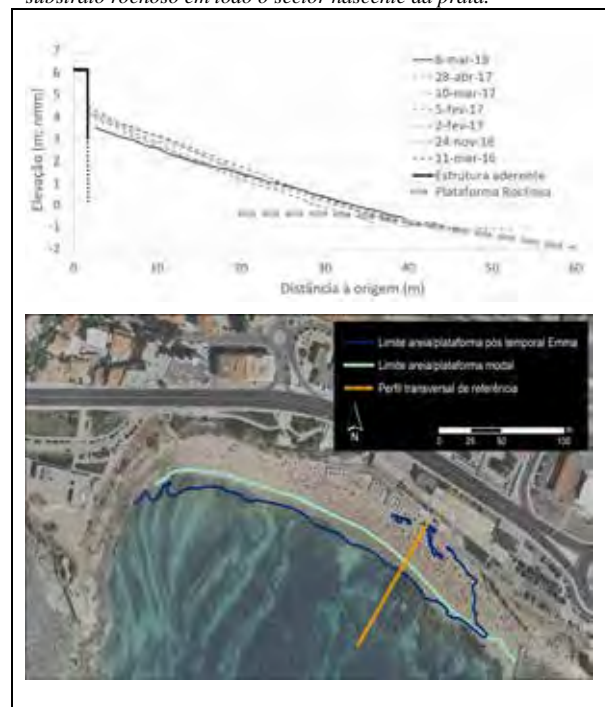


Fig. 6. Resposta morfológica da praia SPE ao temporal *Emma*: em cima, comparação de perfis topográficos de referência; em baixo, modificação da configuração da praia, visível no limite areia/plataforma.

### 5.3. São João da Caparica

Os impactos mais relevantes incluíram: (1) erosão acentuada da superfície da praia, que ficou muito rebaixada, principalmente na sua secção sul, com



exposição da base da defesa aderente e escarpamento da berma no encosto entre a defesa aderente e a duna (Fig. 7, Fig. 8); (2) galgamento do novo cordão dunar (até onde este se eleva pouco acima de 6 m NMM) com particular relevância nas secções centro e sul da praia; (3) escarpamento e recuo da base da duna entre os apoios de praia/restaurante *Pé nú* e *Kontiki* (recoo aproximado de 8 m, com escarpa de 3 m em frente ao *Pé nú* (Fig. 7, Fig. 9A) e recuo de 1 a 2 m com escarpa da mesma dimensão entre o *Pé nú* e o *Kontiki* (Fig. 7, Fig. 9B); (4) escarpamento da praia entre o *Kontiki* e o *Sunset* (Fig. 7, Fig. 9C).

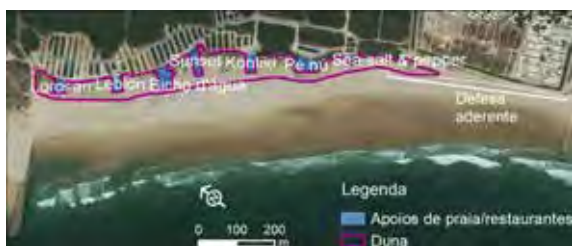


Fig. 7. Praia e duna de SJC. Limite da duna e localização dos apoios de praia/restaurantes sobre imagem da ESRI (Basemap).



Fig. 8. SJC em 06/03/2018 – zona sul (perspetiva para N): A, escarpamento da berma no encosto entre a defesa aderente e a duna; B, erosão muito significativa do areal com exposição do sopé da defesa aderente.



Fig. 9. SJC em 04/03/2018 (fotografia A) e em 06/03/2018 (fotografias B, C) – zona centro-sul. Escarpamento da base da duna desde o apoio de praia/restaurante *Pé nú* (A) e o *Kontiki* (B); escarpa afetando a berma entre o *Kontiki* e o *Sunset* (C).

## 6. CONCLUSÃO

Os impactos da tempestade *Emma* no litoral da região de Lisboa foram de natureza diversa, reflexo da elevada variabilidade geomorfológica dos locais monitorizados.

Nos sistemas de praia, houve adaptação natural ao forçamento. No caso de SJC (Almada), em contexto de praia-duna, registou-se erosão, rebaixamento e recuo do limite terrestre da praia; já na praia de SPE (Cascais), uma pequena praia encaixada em plataforma rochosa e com coroaamento artificializado, a resposta foi igualmente de rebaixamento mas acompanhada de rotação da praia. No caso de um litoral rígido, fortemente intervencionado, como é o caso de Oeiras, os maiores impactos foram os galgamentos e inundações costeiras, por vezes com transporte de detritos, provocando estragos e condicionamentos, afetando diretamente pessoas e bens.

Com estas campanhas foi possível obter dados de forçamento oceanográfico, junto à costa, em regime de tempestade, assim como dados para avaliar a resposta dos sistemas. Estes dados permitirão calibrar e validar modelos de galgamento ou hidromorfológicos que simulem erosão, em contextos geomorfológicos diferenciados.

## Agradecimentos

Projeto PMAACO – *Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas*. Financiado pela Câmara Municipal de Oeiras. Projeto conjunto C.M. Almada/DECAM/Instituto Dom Luiz (FCUL) - *Mapeamento de vulnerabilidades territoriais, de concessão de medidas de adaptação às alterações climáticas em Almada e promoção da resiliência local*. Esta publicação foi suportada pelo projecto FCT UID/GEO/50019/2013 – Instituto Dom Luiz.

## REFERÊNCIAS

- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., & Pais-Barbosa, J. (2006). Estudo das intervenções na Costa da Caparica. Costa da Caparica Coastal Protection Works. *1as Jornadas de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente*, 1, 27-35.
- CMA, 2018. [http://www.m-almada.pt/portal/page/portal/AMBIENTE/DESTAQUES/DETALHE/?ambiente\\_destaque\\_detalhe=231829358&cboui=231829358](http://www.m-almada.pt/portal/page/portal/AMBIENTE/DESTAQUES/DETALHE/?ambiente_destaque_detalhe=231829358&cboui=231829358). Visitado em abril de 2018.

# Monitoring the implementation of a dredging plan in the Óbidos Lagoon (Portugal)

P. Freire (1), A. B. Fortunato (1), L. Portela (1), A. Azevedo (1)

(1) National Civil Engineering Laboratory, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisbon, Portugal, pfreire@lnec.pt

**Abstract:** The Óbidos lagoon (central west coast of Portugal) is a small coastal system exposed to intense wave action. Because its inlet is highly dynamic and closes occasionally, frequent interventions have been carried out by local and national authorities. However, their results have been ephemeral, and the interventions' efficiency needs to be assessed. A monitoring program was applied to understand the morphodynamics of the lagoon during the implementation of a dredging plan in its downstream sector. Topo-hydrographic surveys, airborne and satellite images, wave parameters and water levels data acquired between March 2015 and March 2016 are analysed. Results show that the objectives of the dredging plan were reached regarding the increase of the sandy barrier crest height and the tidal channels deepening. The tidal range inside the lagoon increased significantly as a result of the inlet enlargement and the channels deepening, and the flood dominance decreased leading to a significantly more stable inlet mouth.

**Key words:** Tidal inlet, Morphologic evolution, Hydrodynamics, Monitoring, Dredging

## 1. INTRODUCTION

Coastal lagoons are water bodies limited by a sand barrier that are periodically connected to the ocean by restricted inlets (Woodroffe, 2003). Their characteristics, influenced by the relative balance between wave energy, tide and river inflow, make these systems among the most productive in the world and very attractive for touristic development and leisure activities (Chapman, 2012; Conde *et al.*, 2015; Lillebø *et al.*, 2017).

The Óbidos Lagoon, located in the central west coast of Portugal, presents a highly dynamic inlet. Frequent inlet closure episodes or its migration along the sand barrier, leading to margins erosion, have led the authorities to take mitigation measures often with ephemeral results.

This paper presents and discusses the results of a monitoring program implemented to understand the morphodynamics of the lagoon during the execution of a dredging plan in its downstream sector.

## 2. STUDY AREA

The Óbidos lagoon, located between the Nazaré and Peniche headlands, presents an elongated shape perpendicular to the coast with NW-SE general orientation (Fig. 1). The lagoon is a small system with a surface between 4.4 km<sup>2</sup> (mid-tide) and 8 km<sup>2</sup> (high tide) and an average depth of 3 m (Bruneau, *et al.*, 2011). The lagoon is separated from the sea by a 1.6 km sand barrier and presents two main sectors. The upstream sector is characterised by high sedimentation rates from the watershed inflows. These correspond mainly to the Real, Arnóia and Cal rivers, and are only significant in winter (Maretec, 2004). The majority of the water lines are dry in the summer months.

The downstream sector is controlled by the complex dynamics of the inlet and the flood-tide delta sand bars. The tidal range in the nearby ocean varies between 1 and 4 m, in neap and spring tide, respectively, and the lagoon is exposed to severe wave climate (off-shore significant wave height > 2.5 m during 20% of the time) promoting a very dynamic inlet. During maritime winter the wave action promotes the inlet infilling, reducing the tidal range inside of the lagoon; the situation is reversed in the maritime summer when the tidal currents contribute to enlarge the inlet increasing the tidal range inside the lagoon (Oliveira *et al.*, 2006).

This complex natural dynamics of the lagoon often requires management measures to prevent and/or mitigate consequences in the ecosystem quality (during inlet closure episodes) and in the margins stability (when the inlet approaches the margins during a migration episode).

A dredging plan was proposed (General Plan of Interventions of the Óbidos Lagoon, Fortunato and Oliveira, 2007). The plan consists of dredging the two main tidal channels and several transverse channels. The dredged material is used to reinforce the sand barrier, by increasing its height, and to protect the south margin. The original plan also proposed a partially submerged guiding wall to prevent the southward migration of the inlet mouth. However, the actual intervention was restricted to the dredging of the two main channels, and two of the transverse channels.



Fig. 1. Location of the the Óbidos Lagoon. The target area for the monitoring plan is represented in dash. Image: ESRI Basemap.

### 3. MONITORING PLAN

The monitoring program was designed to: (1) characterize the morphology and the hydrodynamics of the lagoon downstream sector in the reference situation (pre-intervention); (2) monitor the evolution of the water level inside the lagoon, the morphological evolution of the emerged zones, channels, and the inlet position in the sandy barrier; (3) define possible actions to be taken in order to anticipate or mitigate any negative impacts of the intervention. Data were acquired between March 2015 (reference situation) and March 2016 (after the intervention) (see Figure 1 for locations).

#### 3.1. Remote sensing

In order to assess the evolution of the emerged zones, two orthophotos were obtained, one before and another after the intervention. Also, a satellite image (Deimos 2) was acquired on June 2015. The water index (McFeeters, 1996) was calculated in the reference image, allowing the extraction of the water mask (polygon that corresponds to the submerged zone). This mask was validated with the bathymetric line extracted from the digital terrain model (DTM) of the reference situation corresponding to the water level measured at the local tide gauge at the time of the image acquisition. For each image, the water mask was applied along with the terrain mask, that corresponds to the area above the highest astronomical tide line (LMPMAV, Rilo *et al.*, 2014) made available by the Portuguese Environment Agency (APA), and the outer coastal zone mask defined by the surf line. These masks allowed the exclusion of these regions from the images and the clustering algorithm K-means was applied. The classification obtained was used in ArcGIS to map the

morfo-sedimentary units. Despite the lower resolution, the high acquisition frequency of the LANDSAT8 satellite images (extracted from <https://landsat.usgs.gov/>) allowed a qualitative analysis of the inlet evolution.

#### 3.2. Topo-hydrography

Two topo-hydrographic surveys were performed before and after the intervention, in order to assess the bottom evolution in the downstream sector. A previous survey, dated from 2004, was also available. The surveys were compared using the software Surfer (version 8.04) using kriging as gridding method. The topo-hydrographic evolution between the different dates was assessed and the spatial distribution of the volumetric variations analysed.

#### 3.3. Hydrodynamic data

Wave climate in the Óbidos Lagoon area were determined through the data in the wave buoy of the Hydrographic Institute (IH), located near Nazaré. Predictions of LNEC's operational model (Fortunato *et al.*, 2017), available at <http://ariel.lnec.pt>, were used to fill in data gaps.

Similarly, sea levels in vicinity of the lagoon were determined at the nearest tide station located in Peniche (<http://www.emodnet.eu/>) and the results of the operational model of LNEC for the same location were used to fill the data gaps.

Water levels inside the lagoon were acquired through a tide gauge installed by the Hydrographic Institute at the Foz do Arelho pier. Based on these data several parameters were calculated: tidal range; ratio between the tidal range in the lagoon and at the sea; tidal asymmetry, as a proxy of the inlet infilling.

#### 3.4. River discharges

River discharges into the lagoon can contribute positively to the evolution of the inlet, decreasing the flood dominance. In the absence of river discharges information, two alternative sources were considered for a qualitative analysis: precipitation forecasts for Foz do Arelho extracted from <http://www.windguru.cz>; and water height data measured in Real river, provided by APA.

## 4. MORPHOLOGIC EVOLUTION

### 4.1 Morfo-sedimentary units mapping

In the reference situation, the inlet channel was poorly developed and the south channel was very silted (Fig. 2). The areas above Chart Datum (CD) clearly dominated (96.5%) compared to those below CD (3.5%). The main differences in the surface of the lagoon after the intervention are: (1) a significant change of the inlet, with its enlargement; (2) the volume of the main bar of the flood delta (a preferential sedimentation area) is significantly reduced; (3) the absence of the emerging zone from the ebb delta in the post-dredging situation; (4) increment in the area of the flood delta bars, mainly

along the south margin resulting from the dredged material deposition for protection this margin.



Fig. 2. Morfosedimentary units, before (above) and after (below) the intervention.

#### 4.2 Topo-hydrography

The comparison of the surveys before and after the intervention (Fig. 3) shows that the mean elevation was practically unchanged. The deposition and excavation volumes are 600 000 m<sup>3</sup> and 523 000 m<sup>3</sup>, respectively. The dredging of the channels promoted the reduction of the main flood delta bar, which has a tendency for silting. The maximum elevation of the sandy barrier crest, which was between +7 and +8 m CD, shows after the intervention values between +9 and +10 m CD, as foreseen in the project. The slope of the sand barrier also increased significantly.

An interesting development is the formation of a sand spit, in the northern sand barrier, directed to the interior of the lagoon, observed in early 2016. Later

monitoring showed that this sand spit, about 200 m long, had no major impact on the stability of the inlet.

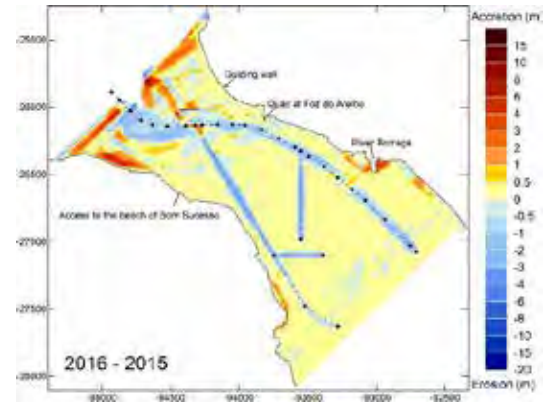


Fig. 3. Comparison of 2016-2015 surveys. The project guidelines are marked in dashed line.

## 5. HYDRODYNAMICS

### 5.1 Forcings evolution

The analysis of the forcings evolution during the intervention showed that the conditions of the levels (tides and surges) were favorable to the maintenance of the inlet open. The occurrence of two storms, with significant wave heights of about 6 m, before the intervention (beginning of March 2015), may have contributed to the inlet closure and the difficulty in reopening it. During the intervention, several storms with significant wave heights of about 5 m occurred without noticeable consequences. The fluvial inflows to the lagoon were very variable without a relevant effect on the inlet evolution.

### 5.2 Water level evolution

As a result of the extensive opening of the inlet and the deepening of the channels, the tidal range in the lagoon increased significantly compared to the reference situation. Also, a progressive decrease in the flood dominance during the maritime summer occurred (Fig. 4). Both conditions contribute to the inlet stability. Thus, the monthly average of the difference between the ebb and flood duration decreases from June to October 2015, typically increasing after that time (Table I).

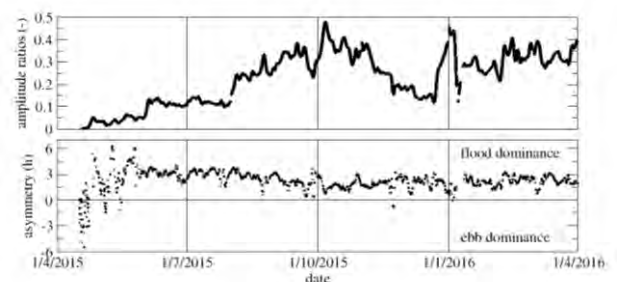


Fig. 4. Tide characteristics inside the lagoon (Foz do Arelho) during the intervention: rate of tidal range in the lagoon and at the sea; tidal asymmetry.

Table I. Evolution of the tide asymmetry in the Óbidos Lagoon during the intervention. Monthly average of the difference between the flood and the ebb durations in the Foz do Arelho pier (in minutes)

2015							
May	June	July	August	Sept.	October	November	December
150	185	185	164	123	106	115	122
2016							
January	February	March					
111	141	133					

## 6. CONCLUSIONS

During the monitoring period the morphological evolution of the downstream sector of the Óbidos Lagoon was determined by the natural hydrodynamic conditions and those resulting from the dredging intervention that mobilized important volumes of material (about 717 000 m<sup>3</sup>).

The objectives of the dredging plan were reached regarding the inlet enlargement and the channels deepening and the increase of the height of the sandy barrier crest by material deposition. The tidal range inside the lagoon increased significantly and the flood dominance decreased leading to a significantly more stable inlet. Also the protection of the residential area of Bom Sucesso (Fig. 1) in the south margin was strengthened by the deposition of dredged material.

During the intervention period, the inlet channel shifted southward and became more meandered. This behaviour could potentially have been avoided with the construction of the proposed guiding wall.

Due to the natural morphological variability of the downstream sector of the Óbidos Lagoon, it is expected that the conditions observed after the intervention will change. The post-intervention monitoring will enable the evaluation of its long term efficiency and the definition of possible corrective measures.

### Acknowledgements

The authors thank the collaboration of the Hydrographic Institute and the Portuguese Environment Agency for authorizing the publication of this study.

### REFERENCES

- Bruneau, N., Fortunato, A. B., Dodet, G., Freire, P., Oliveira, A. and Bertin, X. (2011). Future evolution of a tidal inlet due to changes in wave climate, sea level and lagoon morphology (Óbidos lagoon, Portugal). *Continental Shelf Research* 31, 18, 1915 - 1930.
- Chapman, P. M. (2012). Management of coastal lagoons under climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 110, 32-35
- Conde, D., Vitancurt, J., Rodríguez-Gallego, L., de Álava, D., Verrastro, N., Chreties, C. et. al., (2015). Solutions for Sustainable Coastal Lagoon Management: From Conflict to the Implementation of a Consensual Decision Tree for Artificial Opening. En: J. Baztan, O. Chouinard, B. Jorgensen, P. Tett, J-P. Vanderlinden, L. Vasseur (eds.). *Coastal Zones. Solutions for the 21st Century*, Elsevier Inc., 217–250.
- Fortunato, A. B. and Oliveira, A. (2007). Case Study: Promoting the Stability of the Óbidos Lagoon Inlet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133/7, 816 - 816.
- Fortunato, A.B., Oliveira, A., Rogeiro, J., Tavares da Costa, R., Gomes, J.L., Li, K., Jesus, G., Freire, P., Rilo, A., Mendes, A., Rodrigues, M., Azevedo, A. (2017). Operational forecast framework applied to extreme sea levels at regional and local scales, *Journal of Operational Oceanography*, 10/1: 1-15.
- Lillebø, A. I., Stålnacke, P. Gooch G.D., Krysanova, V. and Bielecka, M. (2017). Pan-European management of coastal lagoons: A science-policy-stakeholder interface perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 648-656
- Maretec (2004). Programa de Monitorização da Lagoa de Óbidos e do Emissário Submarino da Foz do Arelho. Caracterização Da Situação De Referência: Qualidade Da Água Da Lagoa de Óbidos, 57 p. ([http://maretec.mohid.com/projects/FozdoArelho/Relatorios/2004-2005/Rel\\_01\\_Qualidade%20da%20agua%20da%20LO\\_Sit\\_Refer%C3%A4ncia.pdf](http://maretec.mohid.com/projects/FozdoArelho/Relatorios/2004-2005/Rel_01_Qualidade%20da%20agua%20da%20LO_Sit_Refer%C3%A4ncia.pdf)).
- McFeeters, S.K. (1996). The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432.
- Oliveira, A., Fortunato, A.B. and Rego, J.R. (2006). Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal), *Continental Shelf Research* 26, 8, 917 – 942.
- Rilo A., Freire P., Mendes R.N., Ceia R., Catalão J., Tabora R., et al., (2014). Methodological framework for the definition and demarcation of the highest astronomical tide line in estuaries: the case of Tagus Estuary (Portugal), *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 14/1, 95-107 .
- Woodroffe, C.D. (2003). *Coasts. Form, Process and Evolution*. Cambridge University Press, New York, ISBN 0-521-81254-2, 623 pp.

# Análise Morfológica e Fluxos Sedimentares no Canal de Acesso da Desembocadura Sul da Baía de Paranaguá, Brasil

G. Cruz., (1) e A. M. Noernberg (1)

(1) Centro de Estudos do Mar – UFPR, Pontal do Paraná, Brasil. E-Mail: [gui.o.cruz1@gmail.com](mailto:gui.o.cruz1@gmail.com)

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo analisar a morfologia de fundo e os fluxos sedimentares da desembocadura sul da Baía de Paranaguá, Paraná. Através das equações de transporte sedimentar e mapeamentos com sonar de varredura lateral, estimou-se a direção do transporte sedimentar, a velocidade de migração das dunas e os tipos forma de fundo. Os padrões de transporte sedimentar foram analisados durante um ciclo completo de maré semidiurna no mês de dezembro de 2015. No canal principal o fluxo preferencial é de entrada, sendo 57% maior que os fluxos de saída. Observou-se também dois vórtices e circulações residuais próximo às margens de Pontal do Sul e da Ilha do Mel, com direção para a plataforma continental. As dunas grandes foram avistadas nas áreas com maior magnitude de transporte por carga de fundo chegando a ter 94 m de comprimento de onda, com aproximadamente 2,70 m de altura.

**Palavras-chave:** Transporte sedimentar, dunas estuarinas, modelagem numérica

## 1. INTRODUÇÃO

A morfologia de fundo e os fluxos sedimentares próximos a desembocadura sul da Baía de Paranaguá são investigados. Através de simulações realizadas a partir de modelos numéricos e mapeamentos de alta resolução do fundo, obtidos por um sonar de varredura lateral (SVL) e uma sonda multifeixe. A variedade morfológica de padrões e interações que as diversas formas de fundo apresentam estão diretamente relacionadas à dinâmica de fluídos e sedimentar. Consequentemente, esses padrões armazenam de forma indireta mecanismos para estimar a magnitude e a direção do transporte sedimentar. As partículas ao iniciar o movimento formam pequenas ondulações ou dunas até um ponto de equilíbrio, e após certa distância são destruídas, enquanto novas são criadas. A atividade portuária na região é intensa, por isso, este estudo pode auxiliar os engenheiros na manutenção do canal dragado ao estimar as áreas com maior taxa de deposição e a frequência de dragagem.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A baía de Paranaguá, alvo deste estudo, é um extenso sistema estuarino subtropical, dividido em dois eixos: um eixo Leste – Oeste e outro no sentido Norte – Sul. A desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), a qual possui influência do ambiente marinho, é composta por areias médias e finas (0,125 – 0,500 mm), moderadamente para muito bem selecionado. De acordo com Mantovanelli, (2002), este sistema complexo recebe cerca de 70% da drenagem de toda a bacia hidrográfica do Paraná, e possui uma variação média de maré de 1,5 m próximo à desembocadura, e 2,2 m em seu interior, com um prisma de maré de 1,34 km<sup>3</sup> e intrusão de 12,6 km.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a morfologia de fundo e os fluxos sedimentares sobre as diferentes formas de fundo, foi acoplado os mapeamentos realizados pelo SVL com um modelo numérico hidrodinâmico e sedimentar criado a partir do modelo proposto por Krelling et al. (2007).

Em cada ponto da grade computacional, em um buffer de ~ 60 m, foi feita a classificação do fundo de acordo com Ashley e Chairperson (1990), e estimado o comprimento médio de onda das pequenas ondulações e dunas. Para estimar a altura média das dunas foi utilizada a equação proposta por Flemming (1988). A partir das características das dunas um novo mapa de rugosidade de fundo foi feito para o modelo numérico, adotando a soma dos valores individuais de rugosidade (áreas planas, com pequenas ondulações e dunas grandes), conforme proposto por Rijn (1993).

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Formas de fundo

As maiores dunas (Fig.2), demonstraram estar diretamente relacionadas com a magnitude do transporte por carga de fundo, as áreas com pequenas ondulações tiveram magnitude de transporte por carga de fundo menor que as áreas com dunas grandes.

Já na área próxima à Ponta do Poço, devido às altas profundidades e à magnitude das velocidades de corrente, não ocorre a formação de dunas, sendo que a maior parte das partículas sedimentares, ao iniciarem o movimento, vão direto para a coluna d'água seguindo a direção de fluxo das correntes.

As dunas grandes próximas à margem de Pontal do Sul têm formato triangular com pequenas ondulações sobrepostas de direção N/S. Durante os momentos de enchente, o material sedimentar é conduzido estuário

adentro, formando pequenas ondulações e acumulando material sobre as dunas grandes. Na vazante essas ondulações supostamente são destruídas e anexadas às dunas grandes ou à coluna

d'água. A inclinação levemente a leste indica que o transporte sedimentar é predominantemente de enchente, com direção NO.

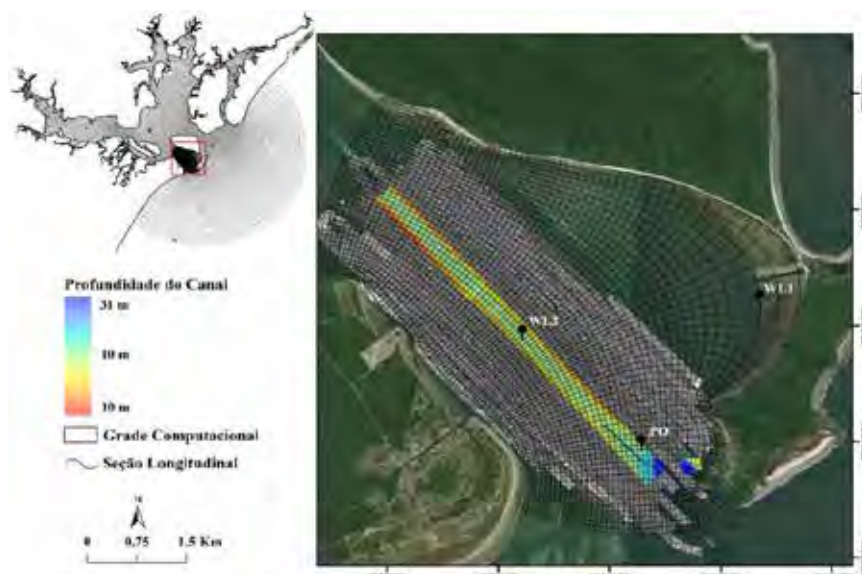


Fig. 1. Grade computacional utilizada no modelo de Krelling et al. (2017) com a área de inserção em vermelho (A). Distribuição espacial das faixas de reflectância obtidas pelo sonar de varredura lateral, a grade computacional gerada nesse estudo e o canal dragado. Os pontos de observação WL1 e WL2 utilizados para comparar a oscilação da maré entre o Saco do Limoeiro e o Canal de Navegação. Ponto de observação PO utilizado para estimar a quantidade material sedimentar cumulativo durante um ciclo completo de maré semi-diurna.

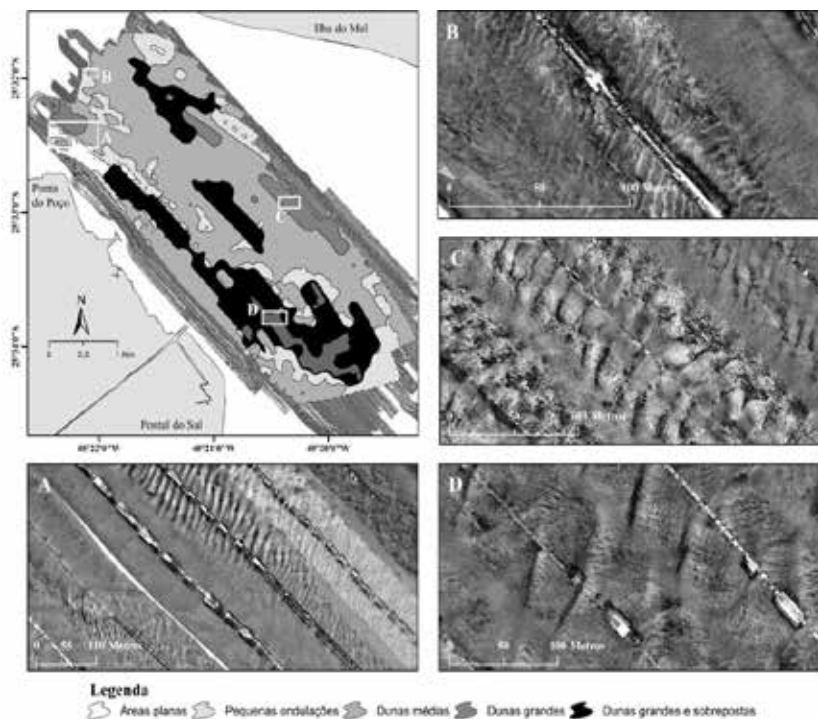


Fig. 2. Formas de fundo

#### 4.2. Simulação Numérica

Os vetores de circulação residual de corrente, marcam a presença de 3 vórtices principais, um na região da Ponta do Poço, entre a margem continental e o canal dragado, e dois na desembocadura em ambos os lados do canal principal, próximo ao Saco do Limoeiro e às margens de Pontal do Sul.

A taxa total de transporte sedimentar médio, é mais evidente na desembocadura e entre a Ponta do Poço e a Ilha do Mel. No canal dragado, os vetores de transporte são estuário adentro; e perto da margem de Pontal do Sul o vórtice ocorre novamente, evidenciando a inversão de fluxo e o começo da circulação residual sedimentar para fora do estuário

indo ao encontro da deriva litorânea na praia de Pontal do Sul.

As principais tendências de transporte para a desembocadura sul, descritas por Lamour *et al.* (2007) e Lamour (2000), estão direcionadas para fora do estuário com direção E/SE. Sem fluxos estuários adentro na desembocadura. Próximo a Ponta do Poço a direção dos fluxos já foi similar com os resultados obtidos neste estudo.

A diferença entre os resultados obtidos por Lamour (2000, 2007) se deve por uma questão de resolução. O método utilizado pelo autor para calcular tais vetores, descrito por Le Roux *et al.* (2002), leva em consideração as características sedimentares. A resolução do mapa de vetores é fortemente dependente do tamanho da malha amostral, dessa forma altas resoluções se tornam impraticáveis por conta dos custos de operação. É possível inferir que no meio do canal o sentido preferencial é de entrada, cerca de 57% maior que os fluxos de saída (ponto PO). Próximo às margens de Pontal do Sul e da Ilha do Mel ocorre a formação de vórtices com fluxos sedimentares estuário afora. Além disso, é possível deduzir que o banco arenoso próximo à Pontal do Sul se forma a partir desse vórtice e dos fluxos sedimentares se encontrando com a deriva litoral.

Na região do Saco do Limoeiro Angulo (1999), por meio de fotografias aéreas e aplicando a classificação de Ashley *et al.* (1990), identificou três classes de forma de fundo: dunas grandes, dunas médias e

pequenas ondulações. Sendo que, a direção de migração das dunas tem sentido de enchente. Entretanto, os levantamentos hidrodinâmicos de Araújo (2001) indicam a tendência de vazante do transporte de sedimentos não coesivos. A evolução geomorfológica do Saco do Limoeiro também mostra que ele tem tendência a exportar sedimentos a longo prazo.

Essa contradição entre a direção de migração das dunas e a evolução geomorfológica da região foi explicada por Araújo (2001) devido à passagem de frente fritas, durante os eventos de maré meteorológica. Entretrando, a frequência com que esses eventos episódicos ocorrem dificilmente formariam dunas com essa magnitude. A gênese das formas de fundos dessa região é explicada mais adequadamente pelos efeitos de oscilação e difração da maré.

Devido as diferenças de profundidade e os efeitos de difração a onda de maré ao adentrar o Saco do Limoeiro se move mais lentamente do que no canal de navegação, confinando a massa d'água na região até o próximo instante de estofa. Após esse alívio a maré ao começar a vazar tem direção SO e então é deslocada gradualmente para NO pela próxima oscilação de maré enchente ingressante. O atraso entre os estofos de maré (aprox. 15 min) e a diferença no nível do mar (até 15 cm), obtidos pelo modelo numérico, evidenciam a ação constante das marés de sizígia sobre a gênese das dunas grandes e dunas médias (pontos WL1 e WL2).

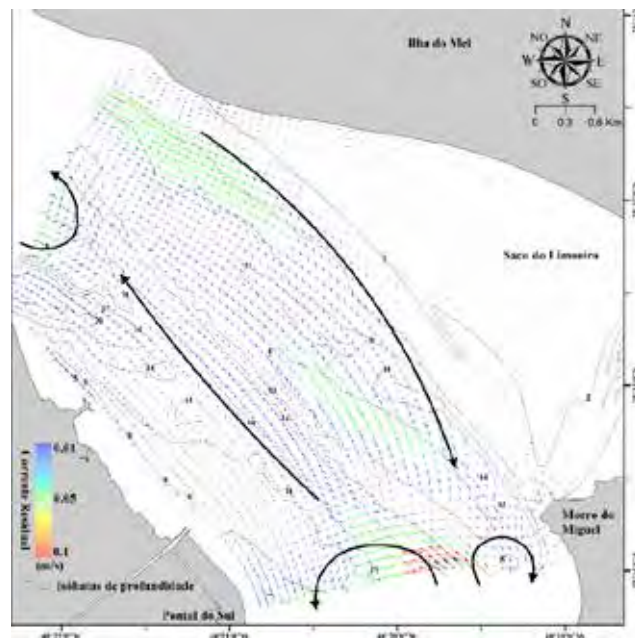


Fig 3. Direção e magnitude da circulação residual calculados durante um ciclo quinzenal de maré, entre 15 e 29 de Dezembro de 2015.

## 5. CONCLUSÃO

Em resumo foi possível concluir que:

— As dunas com maior tamanho estão em perfeita concordância com a quantidade de material

sendo mobilizado pelo fundo, calculado pelo modelo numérico de transporte sedimentar.

— Os vórtices de corrente residual próximos à Pontal do Sul são responsáveis pela sobreposição de pequenas ondulações no barlavento das dunas e pelo formato triangular das dunas grandes.



— As formas de fundo do Saco do Limoeiro, identificadas por Angulo (1999) e Araújo (2001), se formam devido aos efeitos de difração da onda de maré ao adentrar a desembocadura e pelo confinamento da massa d'água na região.

— No meio do canal a direção preferencial do transporte sedimentar é de enchente com circulações residuais perto das margens de Pontal do Sul e da Ilha do Mel, em direção à plataforma continental.

## REFERÊNCIAS

- Araújo, A., 2002. Dinâmica Sedimentar e Evolução Paleogeográfica do Saco do Limoeiro na Ilha do Mel, e sua Relação com o Canal de Acesso ao Porto de Paranaguá. *Boletim Paranaense de Geociências*, 51, 91-114. doi: 10.5380/geo.v51i0.4187.
- Ashley, G.M. e Chairperson, S., 1990. Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem-SEPM Bedforms and Bedding Structures. *Journal of Sedimentary Research*, 60(1), 160-172.
- Flemming, B.W., 1988. Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Bochumer geologische und geotechnischen Arbeiten*, 29, 44-47.
- Krelling, A.P.; Souza, M.M.; Williams, A.T., e Turra, A., 2017. Transboundary movement of marine litter in an estuarine gradient: Evaluating sources and sinks using hydrodynamic modelling and ground truthing estimates. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.034>
- Lamour, M.R., 2000. *Dinâmica Sedimentar do Canal da Galheta, via de Acesso ao Porto de Paranaguá – PR*. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Geologia, dissertação de mestrado. 115p.
- Lamour, M.R., 2007. *Morfodinâmica Sedimentar da Desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR*. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geologia, tese de doutorado. 177p.
- Mantovanelli, A., 2002. Caracterização da Dinâmica Hídrica e do Material Particulado em Suspensão na Baía de Paranaguá e em sua Bacia de Drenagem. *Boletim Paranaense de Geociências*, 51, 91-114. doi:10.5380/geo.v51i0.4173

# Bathymetry of the lower Douro Estuary before and after breakwater construction

J. Pinheiro (1), J. A. Gonçalves (1,2), A. Magalhães (3), L. Bastos (1,2), I. Iglesias (1), A. Bio (1)\*

(1) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR/CIMAR), University of Porto, Edifício do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos, S/N, 4450-208 Matosinhos, Portugal. E-mail: [anabio@ciimar.up.pt](mailto:anabio@ciimar.up.pt)

(2) Department of Geosciences, Environment and Spatial Plannings, Faculty of Sciences, University of Porto, Rua Campo Alegre 687, 4169 - 007 Porto, Portugal

(3) Observatório Astronómico, Faculty of Sciences, University of Porto, Vila Nova de Gaia, Portugal

**Abstract:** Bathymetry data for the lower Douro Estuary, obtained between 2002 and 2017, were analysed and compared to assess possible effects on bottom morphodynamics of the Douro mouth jetty and breakwater, which were, respectively, extended and built between 2004 and 2008. Data sets were supplied by the Hydrographic Institute or collected in the scope of a MSc project, and the different equipment and processing methodologies used had to be taken into account.

Results show that the breakwaters changed local bottom topography. After breakwater construction, water depth increased in parts of the navigation channel, confirming the desired effect of providing better conditions for navigation. On the other hand, marked accretion was observed in zones around the estuarine spit, with potential negative effects. Overall, breakwaters seem to have a stabilizing effect on the estuary's bottom dynamics.

**Key words:** bathymetry, breakwater, Douro estuary, GIS

## 1. INTRODUCTION

The Douro estuary is of natural and great socio-economic value. Lined by densely populated margins, the estuary lies embedded in a steep valley, extending 21.6 km from its upstream boundary at the Crestuma-Lever dam to the river mouth. On the southern margin of the outlet, a sand spit constrains the opening towards the sea, protecting the inland from ocean waves. This sand spit used to be highly dynamic, with its head repeatedly progressing towards the north and conditioning navigation. Starting October 2004, the jetty on the north bank of the river mouth was extended by about 350 m, and a new 450 m long curved detached breakwater was built seawards of the spit.

These interventions aimed to change local hydrodynamics in order to stabilize the spit and improve water flow in the navigation channel, to increase navigation safety and reduce the need for regular channel dredging. Previous studies show that the sand spit has not only stabilized but also continuously grown since breakwater construction (Bastos et al., 2012).

In the present work, the bottom morphology and dynamics of the lower Douro estuary is studied, using surveys between 2002 and 2017 to assess patterns before and after breakwater construction.

## 2. DATA & METHODS

The bathymetry of the lower Douro estuary has been regularly monitored by the national Hydrographic Institute (IH – Instituto Hidrográfico) and by port authorities (APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, SA). IH and APDL kindly supplied a series of bathymetry data: bathymetry data from 2002 (month unknown), which were already processed and interpolated on a regular grid (spatial resolution: 10 m); uninterpolated survey data from May 2006, distributed along survey tracks (6 m resolution along track, 15 m between tracks in the estuary, 25 m between tracks offshore); and data from June/July 2009, which were interpolated, but on an irregular mesh (about 20 m between points) (Fig. 1).

Next to these bathymetries, we surveyed bathymetry in April 2017, within a MSc project. Data were obtained using a low-cost single beam sonar in combination with a dual-frequency differential high-precision GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver (Fig. 2). No inertial measurement unit (IMU) was used. Therefore, effects of boat pitch, roll and yaw were neglected. Sonar depth measurements and GNSS positions were integrated using the GPS time of the two devices for synchronisation. The depth-position values were derived using the GNSS heights (considering the offset between the positions of the GNSS receiver and the sonar) without the need for tidal corrections. This method resulted in depth values with an

absolute error below 25 cm (validated through tests navigating the boat at various speeds).

Bathymetry data were processed, analysed and mapped in a GIS (ArcGIS 10.5). All data (even the dense already interpolated 2002 and 2009 data) were interpolated, to obtain comparable regular bathymetry rasters with 10 m cell size.

The ArcGIS Natural Neighbor interpolation tool was used, which finds the closest subset of input samples to a query point and applies weights to them based on proportionate areas to interpolate a value (Sibson, 1981). This method is intrinsically local, using only a subset of samples that surround a query point. Interpolated depths are guaranteed to be within the range of the samples used, no trends are inferred and interpolation will not produce peaks, pits, ridges, or valleys that are not already represented by the input samples. As a result, the surface passes through the input samples and is smooth everywhere except at locations of the input samples. Therefore, interpolation of the 2002 and 2009 data did not alter the supplied data points interpolating only between them and towards a regular data grid.

The resulting DTMs (Digital Terrain Models) were compared and differences between surveys were computed using map algebra.

For the analysis of differences between surveys, only depth changes  $>1$  m (accretion) and  $< -1$  m (erosion) were considered. This was done to account for: survey errors, which are likely around or above 20 cm; the use of different data types (from raw to interpolated data); and the fact that different survey equipment and methods were used.

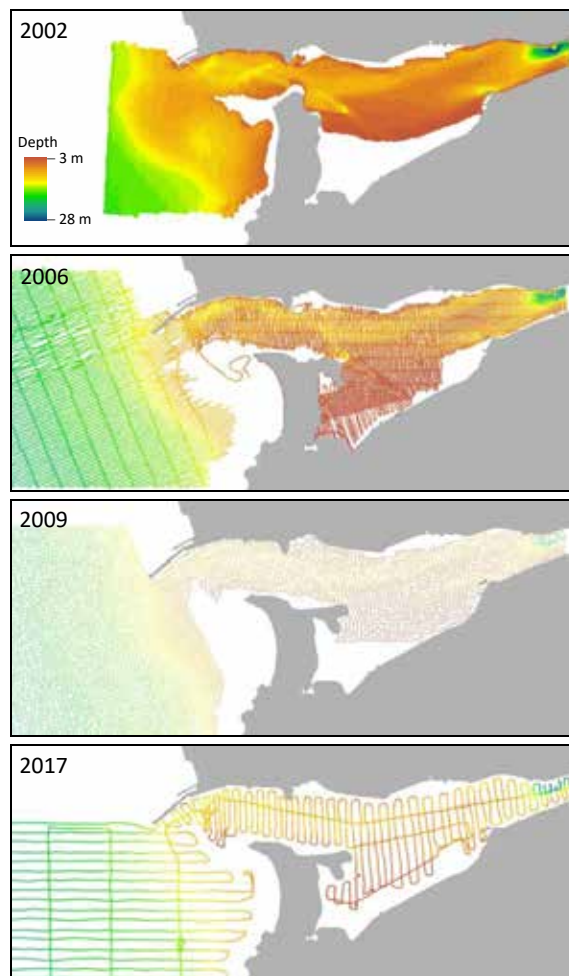


Fig. 1. Bathymetry data from IH/APDL, with 2002 data on a regular grid, 2006 data along survey tracks and 2009 data on an irregular grid, and data from a MSc project, from 2017, along survey tracks.



Fig. 2. Global Navigation Satellite System mounted on the survey boat.

### 3. RESULTS & DISCUSSION

DTMs (Fig. 3) show the navigation channel, the shallow São Paio bay next to the sand spit (which was not sampled in 2002) on the southern margin, a consistent deep area at the eastern (upriver) limit of our study area, and the ocean bottom morphology outside the estuary, which has become steeper after 2002

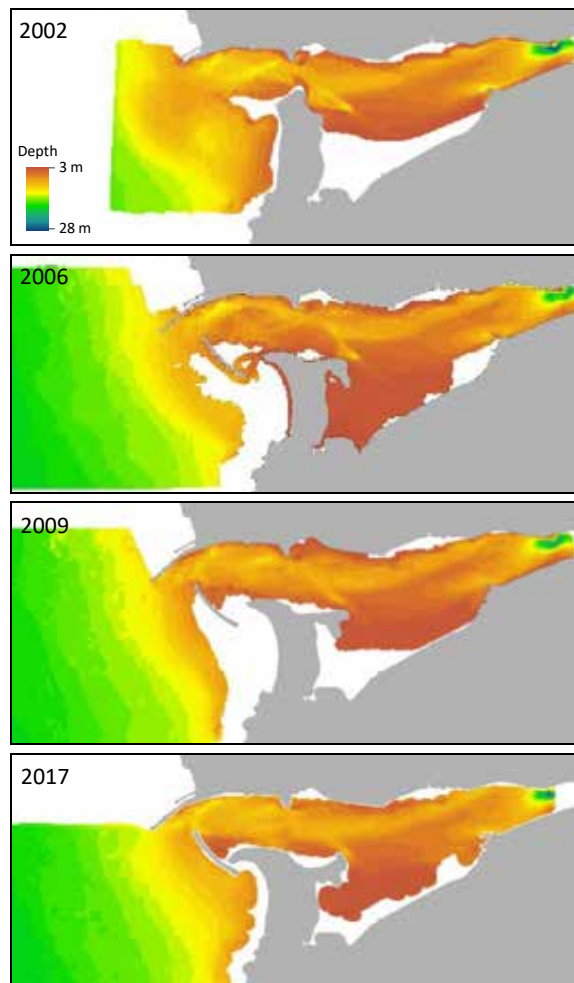


Fig. 3. DTMs obtained through Natural Neighbor interpolation of the bathymetry data in Fig. 1.

Comparison between surveys (Fig. 4) shows marked differences between the 2002 and 2006 surveys. As expected (IPTM, 2003) breakwater construction changed hydrodynamics at the outlet, accelerating water flow between the northern jetty and the detached breakwater, which caused erosion of the submersed sand bank next to the outlet. This observed sediment loss may also suggest less sediment supply, from the river and/or the ocean, after 2002.

On the other hand, significant accretion was observed in areas to the north of the sand spit, narrowing the navigation channel. These areas recovered their depth after 2006, when the

breakwater was already almost completely in place, as can be seen in the difference maps between 2006 and 2009 and between 2009 and 2017.

Comparing the situation before the intervention, in 2002, with the present situation, 2017, the major bottom morphology changes were observed offshore the estuarine outlet (Fig.4, a; as explained for the 2002-2006 comparison) and around the sand spit head.

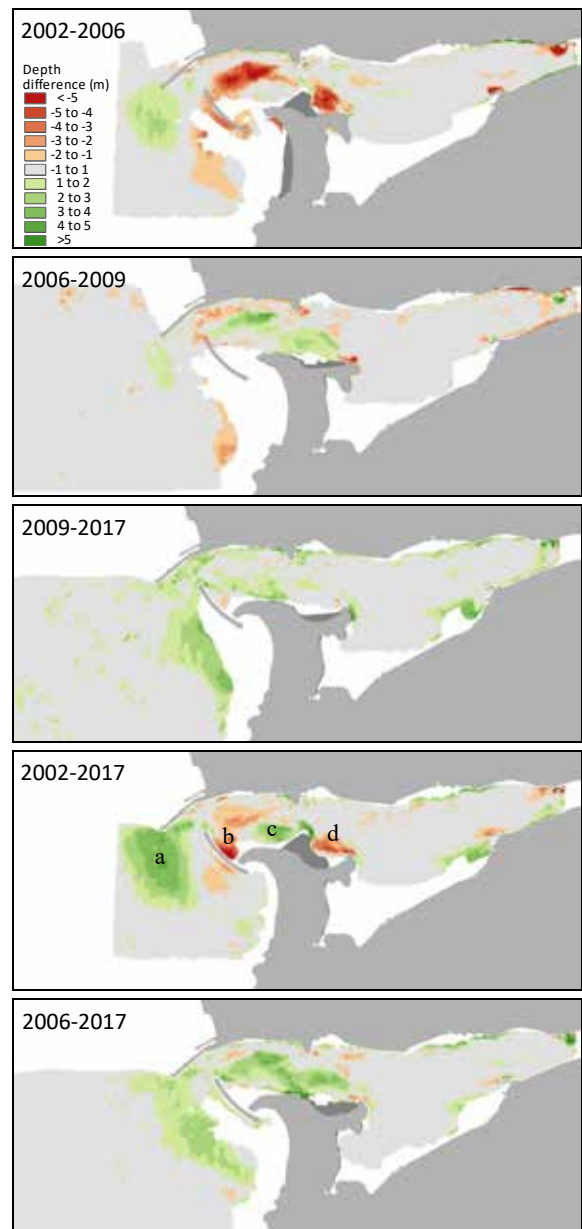


Fig. 4. Depth differences between surveys. Only accretion (red)  $>1$  m and erosion (green)  $<-1$  m are presented to account for errors and discrepancies between data. Marked areas of erosion/accretion (a-d) are explained in the text.

The spit head showed a central area of erosion (Fig. 4, c), and areas of accretion above the spit extension (Fig. 4, d) that developed to the east after breakwater construction and to the east of the detached

breakwater (Fig. 4, b), which acts as a sediment trap causing the formation of a tombolo between the spit head and the breakwater. This accretion has also been observed on the western part of the sand spit itself. The spit has increased in area and volume providing a good protection against the sea but also becoming an increasingly unbreachable obstacle to the drainage of possible river floods.

Between 2006 and 2017 the lower estuary has mainly deepened, above the sand spit along the navigation channel, and outside the estuary. Overall it also seems that bottom dynamics has become less accentuated (lower height differences) after the intervention.

#### 4. CONCLUSION

Breakwater construction changed the hydrodynamics and bottom morphology of the lower Douro estuary, particularly around the estuarine sand spit and in the area immediately outside the estuary.

Morphodynamics became less accentuated and restricted to areas outside the apparently stabilized navigation channel.

#### Acknowledgements

This research was partially supported by the Strategic Funding UID/Multi/04423/2013 through national funds provided by FCT – Foundation for Science and Technology and European Regional Development Fund (ERDF), in the framework of the programme PT2020, and by the project MarInfo – Integrated Platform for Marine Data Acquisition and Analysis (reference NORTE-01-0145-FEDER-000031) and by the Research Line ECOSERVICES, integrated in the Structured Program of R&D&I INNOVMAR: Innovation and Sustainability in the Management Resources (NORTE-01-0145-FEDER-000035), both supported by the North Portugal Regional Operational Programme (NORTE 2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund (ERDF).

#### REFERENCES

- Bastos, L., Bio, A., Pinho, J. L. S., Granja, H. and Silva, A. J. (2012). Dynamics of the Douro estuary barrier sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53-69.  
DOI 10.1016/J.ECSS.2012.05.017.
- Sibson, R. (1981). A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In: V. Barnett (eds.) *Interpreting Multivariate Data*. John Wiley & Sons, New York, 21-36.
- IPTM – Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos (2003). Estudo de impacte ambiental

das obras de melhoria de acessibilidade e segurança da barra do Douro. Report (in Portuguese).

# Morphodynamics in the vicinity of a groyne with 2D and 1D numerical models

F. S. B. F. Oliveira (1), J. Ruas (2) and A. Trigo-Teixeira (3)

- (1) Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foliveira@lnec.pt  
 (2) Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, joanafeneja.ruas@gmail.com  
 (3) CERIS, Instituto Superior Técnico, trigo.teixeira@ist.utl.pt

**Abstract:** The coastline advance and retreat at the updrift and downdrift sides of a groyne are impacts well known. However, the complex interaction mechanisms that depend on the structural design parameters and their relation to the wave, sediment and topo-hydrographic characteristics of the site in which such coastline stabilization structure is implemented need further investigation to improve the efficiency of the structure. Numerical modelling of the morphodynamics in the surrounding area of a groyne is a useful resource to study the wave induced currents, the sediment fluxes and the morphological evolution around groynes. The study explores the comparison of different numerical models, 2D-horizontal and 1D-alongshore, to assess the morphodynamics around a groyne, a dynamic zone in which data acquisition has several constrains. The study zone is representative of the surroundings of Costa de Lavos and Leirosa groynes, located south of Figueira da Foz.

**Key words:** cross-shore structure, surf zone, beach, medium-term, coastal processes

## 1. INTRODUCTION

The long-term erosion phenomenon observed in the last decades in large extensions of the Portuguese coast is likely to be intensified in the next decades due to the impact of climate changes, in particular the sea level rise acceleration, as predicted by Antunes and Taborda (2009) based on the assessment of a tidal gauge time series located in the central west mainland Portugal (Cascais). The impacts of the phenomenon will be particularly serious for the populations of maritime frontages prone to overwashing and inundation during maritime storms.

The recommended national policy for the present and future of the coastal zone is that the human occupation of the coastal zone and the activities there performed should respect and adapt to the present and future coastal dynamics (Santos *et al.*, 2014). As strategies of adaptation, three types are considered: protection, relocation and accommodation. The first strategy, protection, is defined as maintaining or advancing the coastline through artificial beach nourishment, rehabilitation of dune systems, construction of artificial dunes and respective ecosystems and construction of stabilization structures like groynes, detached breakwaters and seawalls.

The morphodynamics of these complex wave-structure-sediment systems is not yet fully understood. In order to perform optimized protection interventions, it is necessary to improve the understanding of their elements' interaction processes and the resulting effect on the

morphodynamics of the adjacent zones at a wide range of time scales.

Several investigation methods to improve the knowledge on the subject can be applied, either individually or in an integrated manner: theoretical process-based numerical modelling, laboratory experimentation and analytical techniques for interpretation of field and laboratory observations (Pattiaratchi *et al.*, 2009; Razak *et al.*, 2013; Kristensen *et al.*, 2016). The present study falls within the first category. The main objective is the comparison of different process-based numerical models, 2D-horizontal and 1D-alongshore, to assess the morphodynamics around a groyne since data acquisition in such dynamic zone has limitations. The hydro- and geomorphological characteristics and the groyne dimensioning parameters of the case study are representative of Costa de Lavos and Leirosa maritime frontages (Figure 1), located at approximately 5.75 and 9.70 km from the south jetty of Mondego river inlet.

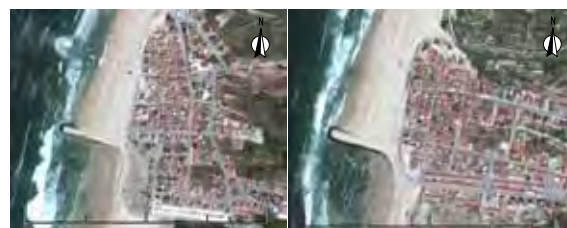


Fig. 1. Costa de Lavos (left) and Leirosa (right) maritime frontages (© Google Earth).

## 2. DATA AND METHODS

### 2.1. Morpho-sedimentologic initial conditions

The impacts of the Costa de Lavos and Leirosa groynes, constructed in 1979 and 1978, respectively, for the stabilization of the coastline when both maritime frontages were under severe erosion, were described by Oliveira and Brito (2015), who also characterized the present representative morpho-sedimentologic conditions of the sites. The morphology of the study zone was simplified in order to limit the complexity of the underlying physics computations. It was assumed alongshore uniformity and a three sloping beach profile: 1:77 slope in the submerged profile, between 12 m below the zero of the nautical chart datum (named ZH) and ZH; 1:25 slope in the beach face, located between ZH and 4 m above ZH; and 1:3.5 slope in the frontal dune face, assumed located between 4 m above ZH and the frontal dune crest, 14 m above ZH (Figure 2). The grain size was considered uniform with median diameter,  $D_{50}$ , equal to 0.3 mm and specific gravity equal to 2.65.

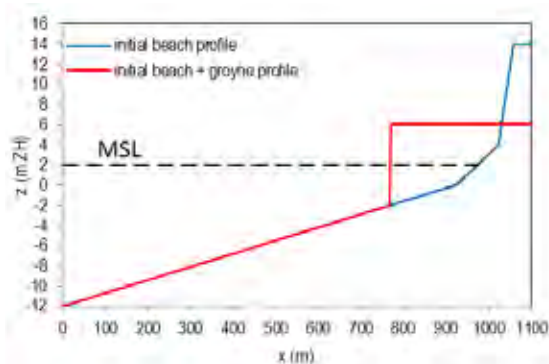


Fig. 2. Initial cross-shore profile: beach and groyne.

### 2.2. Hydrodynamic forcing conditions

Stationary wave and sea level conditions were prescribed at the offshore boundary: i) the mean wave for the coastal stretch between Mondego river and Lis river inlets, with significant wave height ( $H_s$ ) 2.15 m, peak period ( $T_p$ ) 11.5 s and mean direction ( $Dir$ )  $299.5^\circ N$  ( $10^\circ$  towards NW with respect to the shoreline normal in this stretch of the coast), as determined by Oliveira *et al.* (2016) through a statistic analysis of a validated hindcast wave parameters time series for the period 1952-2010; and ii) the mean sea level (MSL), 2 m above ZH.

### 2.3. Methods

Two process-based numerical models were applied: a 2D-horizontal, Delft3D (Deltares, 2012); and 1D-alongshore, Litline (DHI, 2016).

The computational domain of the Delft3D model includes two grids: a larger grid for the waves

solver, which covers an area of  $4000 \times 1100 \text{ m}^2$  in the alongshore and cross-shore directions, respectively, and a smaller grid for the flow and morphodynamics solver, which covers an area of  $2000 \times 790 \text{ m}^2$  in the alongshore and cross-shore directions, respectively, both grids with resolution  $dx=dy=5 \text{ m}$ . The groyne, with 20 m width and 6 m above ZH of crest height, was placed in the middle of the domain from the land boundary until 2 m below ZH at the initial bathymetry (Figure 2).

The coupling time between the Flow and the Wave modules was set equal to 10 min.

The computational domain of the Litline model includes: an initial straight coastline (considered as the MSL isoline), with 4000 m, and the cross-shore profile of Figure 2, both with the same spatial resolution  $dx=dy=5 \text{ m}$ .

At the lateral boundaries, both models were forced with Neumann boundary conditions.

The two models were calibrated with respect to the longshore transport rate (Figure 3). The permanent action of this forcing wave during one year drives a littoral drift of  $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ , which is in agreement with previous knowledge since the mean wave has a higher transport capacity than the most frequent wave, with  $H_s=1.25 \text{ m}$ ,  $T_p=9 \text{ s}$  and mean direction  $Dir=305^\circ N$  (Oliveira *et al.*, 2016).

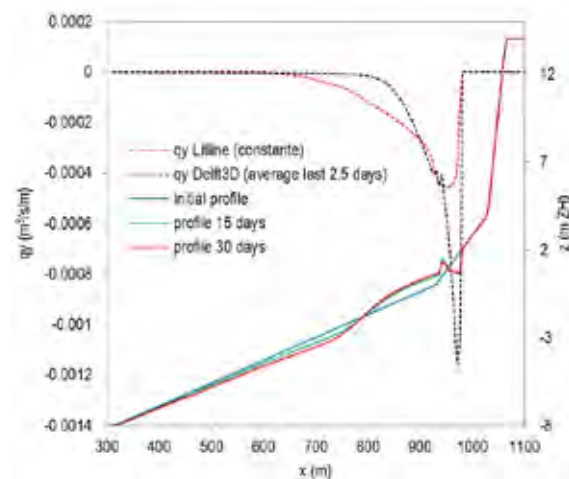


Fig. 3. Simulated longshore sediment transport rate (results of Delft3D and Litline models) and profile evolution (results of Delft3D model) in the study zone, in the absence of groyne, for waves with  $H_s=2.15 \text{ m}$ ,  $T_p=11.5 \text{ s}$  and  $10^\circ$  angle of incidence.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The Delft3D model outcome in predicting the morphological evolution in the surroundings of the groyne (considered as “thin dam” in the Flow module and as “dam” obstacle type in the Wave module computations) during 30 days of local mean wave action is presented in Figures 4 and 5. The stationary wave and sea level boundary conditions produced:

i) sedimentation at the updrift side, with impact until about 500 m further north of the groyne, due to the blocking effect of the groyne on the longshore current induced sediment fluxes, and sand bypassing in front of the groyne tip (Figure 4). Close to the groyne the increasing of the profile elevation exceeds 3.5 m. At 100 m north of the groyne the profile exhibits sand accumulation until the initial depth of -3.3 m ZH and the positions corresponding to the ZH and MSL depths advanced 170 and 50 m seaward, respectively (Figure 5a);

ii) erosion of the lower beach face in the updrift and downdrift sides of the groyne, but more evident in the downdrift side, due to the wave induced cross-shore sediment fluxes associated to oblique submerged bars, quasi-rhythmic (rip-like) bottom features, typically developed when waves attack the coast at angles smaller than  $30^\circ$  with respect to the shore normal (Figures 4 and 5b). The cause of the growing of this bedforms which can be observed in nature remains uncertain: either natural instabilities of the system or model inaccuracies (Giardino *et al.*, 2010).

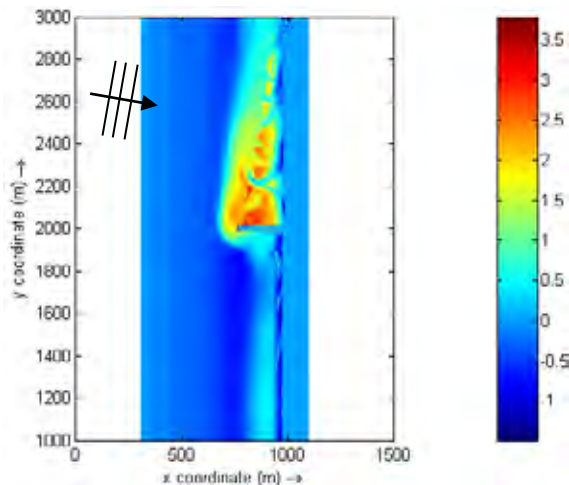


Fig. 4. Simulated cumulative erosion/sedimentation (m) after 30 days for waves with  $H_s=2.15$  m,  $T_p=11.5$  s and  $10^\circ$  angle of incidence (results of Delft3D model).

The Litline model outcome in predicting the MSL isoline evolution in the surroundings of the groyne is presented in Figure 6. After 30 days the maximum advance of the MSL isoline was 55 m at the cell adjacent to groyne in the updrift side, and the maximum retreat of the MSL isoline was 41 m at 115 m south of the groyne. The groyne tip is in shallower water depth than the closure depth (Figure 3), therefore, the sand bypassing is continuous. The impact of the groyne on the MSL isoline advance and retreat is noticeable until about 700 m from the groyne. The result at the updrift side of the groyne agrees with observations made by Oliveira and Brito (2015).

The comparison of the outcome of the models is presented in Figure 7. Updrift of the groyne the

Delft3D model simulates a larger advance of the MSL isoline than the Litline model but the opposite is observed for the area further from the groyne. Downdrift of the groyne the Litline model simulates a larger retreat of the MSL isoline than the Delft3D model but further from the groyne the models show a better agreement.

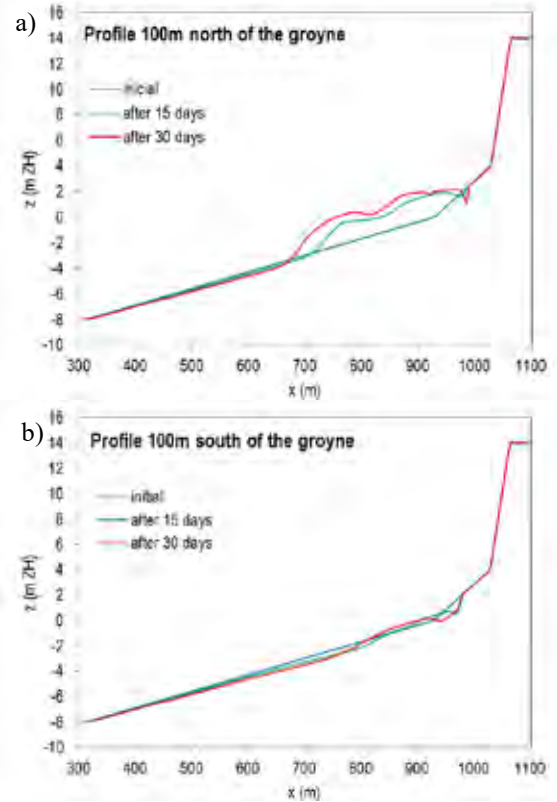


Fig. 5. Simulated profile evolution 100m north (a) and 100m south (b) of the groyne, for waves with  $H_s=2.15$  m,  $T_p=11.5$  s and  $10^\circ$  angle of incidence (results of Delft3D model).

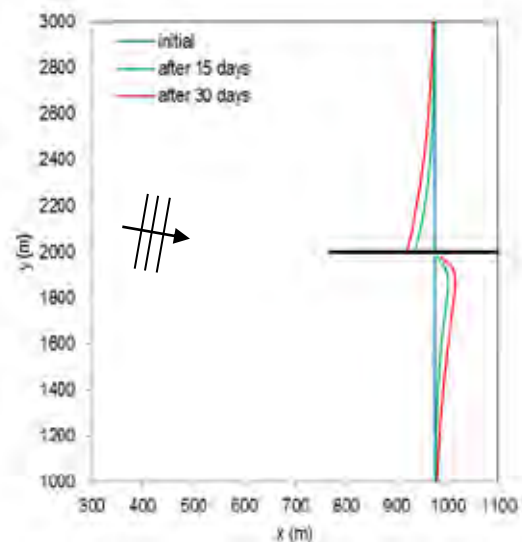


Fig. 6. Simulated shoreline evolution in the vicinity of a groyne subjected to waves with  $H_s=2.15$  m,  $T_p=11.5$  s and  $10^\circ$  angle of incidence: a) initial, b) after 15 days and c) after 30 days (results of Litline model).



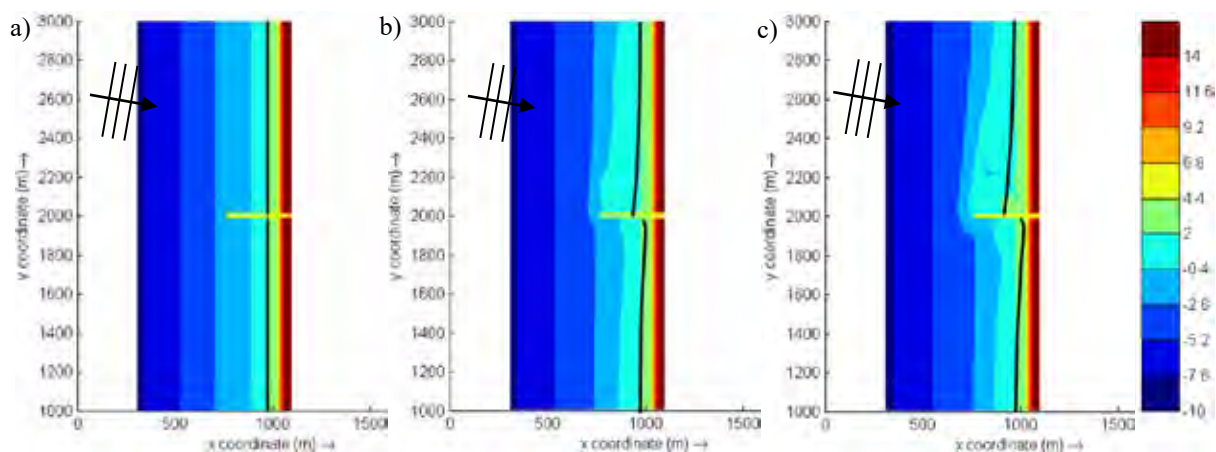


Fig. 7. Simulated bathymetries in the vicinity of a groyne subjected to waves with  $H_s=2.15$  m,  $T_p=11.5$  s and  $10^\circ$  angle of incidence: a) initial, b) after 15 days and c) after 30 days. Colour scale (m ZH) for the Delft3D model results and black line (2 m ZH) for the Litline model results.

#### 4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

A comparison between a 2D-horizontal and a 1D-alongshore process-based morphodynamic numerical models for the case of the morphologic evolution of an alongshore uniform bathymetry submitted to an oblique wave in the presence of a groyne has been performed. The models were calibrated using the longshore sediment transport.

The blocking effect of the groyne to the sediment fluxes induces a large variability of the beach cross-shore profile in the updrift side of the groyne showing that the governing morphodynamic processes are mainly two dimensional. The 1D-alongshore model assumes the displacement (advance/retreat) of a constant cross-shore profile which is unrealistic for this area and can have a relevant impact in the sand bypassing process in front of the groyne tip and in the adjacent area downdrift of the groyne.

Other tests with a less erosive wave, like the most frequent wave, should be done in order to investigate if the smaller retreat of the MSL isoline obtained with the 2D-horizontal model in the adjacent area of the groyne at the downdrift side was due to the submerged bar effect of protection.

#### Acknowledgements

The work described was supported by FCT through the project CYTED 2017-PE-PROTOCOL.

#### REFERENCES

- Antunes, C. and Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. *Journal of Coastal Research* SI(56):218-222.
- Deltares (2012). Delft3D-Flow. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Version - 3.15.20508, Deltares, The Netherlands, 650 pp.
- DHI, 2016. Coastline Evolution. Litline User Guide. Danish Hydraulic Institute, 164 p.
- Giardino, A., Werf, J.V.D. and Ormond, M.V. (2010). Simulating coastal morphodynamics with Delft3D: case study Egmond aan Zee. Report of Project 1200635-005. Deltares Delft Hydraulics, 72 pp.
- Kristensen, S.E., Drønen, N., Deigaard, R. and Fredsoe, J. (2016). Impact of groyne fields on the littoral drift: a hybrid morphological modelling study. *Coastal Engineering*, 111, pp 13-22.
- Oliveira, F.S.B.F. and Brito, F.A. (2015). Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 1975 a 2011. *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Aveiro, Portugal, CD-ROM, 15 pp.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F. and Teixeira, A.T. (2016). Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, IH, Lisboa, Portugal.
- Pattiaratchi, C., Olsson, D. Hetzel, Y. and Lowe, R. (2009). Wave-driven circulation patterns in the lee of groynes. *Continental Shelf Research*, 29, pp 1961-1974.
- Razak, M.S.A., Dastgheib, A. and Roelvink, D. (2013). Sand bypassing and shoreline evolution near coastal structure, comparing analytical solution and XBeach numerical modelling. *Journal of Coastal Research*, SI, No. 65, pp 2083-2088.
- Santos, F.D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L. and Taborda, R. (2014). Caracterização da zona costeira de Portugal continental. *Relatório do grupo de trabalho do litoral*. Lisboa, 158 pp.

# Statistical tools to understand ADCP backscatter response to suspended sediment attribute variations

A.I. Santos (1,2), D. Carinhas (1,3) and A. Oliveira (1)

- (1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49 – 1249-093 Lisboa, Portugal, [ana.santos@hidrografico.pt](mailto:ana.santos@hidrografico.pt)
- (2) IDL/Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal
- (3) IIFA/Universidade de Évora, Palácio do Vimioso Largo Marquês de Marialva, 7002-554 Évora, Portugal

**Abstract:** In the present work, an evaluation of the use of ADCP (acoustic Doppler current profiler) backscatter data as a sediment profiler is made, based on concurrent ADCP and LISST time series. Multivariate statistical techniques like cluster analysis was applied to the resulting variables in order to separate different populations of ADCP acoustic response through time and better understand how changeable suspended particle attributes (concentration and grain size) affect ADCP response

**Key words:** Suspended sediments, ADCP, acoustics; cluster analysis

## 1. INTRODUCTION

The basic principles of suspended sediment characterization using backscatter and attenuation of acoustic signals are that sound waves passing through a water-sediment mixture will be scattered and attenuated as a function of sediment, fluid, and instrument properties. The acoustic metrics of backscatter and attenuation relate functionally to sediment characteristics (concentration, size, and shape) within an ensonified volume after adjusting for the influence of fluid and instrument properties (Landers, 2010).

Most of the existing literature regarding the use of acoustic transducers to assess suspended sediment parameters reports a logarithmic form of the sonar equation in its simplified form for reverberation (Gartner, 2004). This logarithmic form of the sonar equation can be derived from the base expression presented by Thorne and Hanes (2002), where the received sound intensity ( $I$ ) recorded by an ADCP depends on: i) an acoustic reference level at unit distance and the acoustic system setting which may both be represented by a constant ( $K_t$ ); ii) the ability of suspended particles to scatter sound back to the transducer (i.e., backscattering strength -  $\sigma_s$ ) at a distance  $R$ ; iii) and the two-way round-trip sound attenuation and geometrical spreading (transmission losses).

$$\frac{I}{K_t^2} = \frac{K_s^2 M_s}{R^2 \psi^2} e^{-4(\alpha_w + \alpha_s)R}$$

In this equation, the backscattering strength of the particles ( $\sigma_s$ ) is the square of the backscattering coefficient  $K_s$  times the suspended sediment mass concentration  $M_s$ ;  $\alpha_w$  and  $\alpha_s$  represent the fluid and suspended sediment sound attenuation coefficients, respectively; and  $R^2 \psi^2$  is the geometrical spreading that includes the near field correction coefficient ( $\psi$ ) (Downing et al., 1995).

According to this base equation, a direct relation exists between the acoustic response of an ADCP and the suspended sediment signature present in the measured water column, therefore, it is expected that different suspended sediment signatures in terms of concentration and grain size distributions will yield different ADCP acoustic responses. Cluster analysis partitions sample data into groups or clusters. Clusters are formed such that objects in the same cluster are very similar, and objects in different clusters are very distinct. Taking this into consideration, along with the theoretical hypothesis that different suspended sediment signatures yield different ADCP acoustic responses, cluster analysis is applied to ADCP acoustic intensity time series, in order to identify different “populations” of acoustic responses within the time series. LISST data will then be used to classify the identified clusters/populations in terms of suspended sediment signatures and to determine if the different identified clusters match significantly different suspended sediment populations

## 2. METHODS

### 2.1. Field work

Two datasets including ADCP with concurrent LISST measurements were collected in 2011 and 2014. Field configurations consisted of one ADCP working at 1228.8 kHz frequency moored looking down together with the LISST probe measuring the current structure in the first meter of the water column with 0.2 m measuring cells (bins), allowing for simultaneous reading of both LISST and ADCP at approximately 80 cm above sea floor. The 2011 dataset was collected at a position offshore S. Pedro de Moel – Z. Piloto at approximately 25 m depth in Sep. 2011 and the second dataset was collected offshore Costa da Caparica at approximately 15 m depth in Oct./Nov. 2014. Further details about these

field surveys can be consulted in Santos et al. (2014), and Santos (2016).

## 2.2. Data processing

LISST-100 and ADCP data was downloaded from the instruments' internal memory and converted into ASCII data series using the manufacturers' software. LISST data was processed assuming randomly shaped particles and validated for concentration limits. Both ADCP and LISST time series were averaged in order to obtain synchronous hourly samples. 211 and 433 hourly samples were validated for the 2011 and 2014 datasets, respectively. The logarithmic form of the acoustic intensity  $I$  (dB) in decibels was calculated according Goustiaux & Haren (2010), taking into account  $E_{I_{noise}}$ :

## 2.3. Cluster analysis

K-means clustering aims to partition  $n$  observations into  $k$  clusters in which each observation belongs to the cluster with the nearest mean, serving as a prototype of the cluster. K-means treats each observation in a dataset as an object having a location in space. It finds a partition in which objects within each cluster are as close to each other as possible, and as far from objects in other clusters as possible. Each cluster in the partition is defined by its member objects and by its centroid, or centre. The centroid for each cluster is the point to which the sum of distances from all objects in that cluster is minimized. In the case of this work, the concept of distance in the application of the k-means algorithm

is substituted by time since the ADCP will respond not to spatial variations of the suspended sediments signatures but to the temporal variation induced by the several forcing agents acting on a single point in space. K-means cluster analysis was applied to both datasets to the variable pair "time + ADCP I", for  $k=3$  (3 clusters).

## 2.4. Kruskal-Wallis test

The Kruskal-Wallis (KW) test is a non-parametric test used to compare three or more populations. The KW test is used to test the null hypothesis ( $H_0$ ) that all populations have equal distribution functions against the alternative hypothesis ( $H_1$ ) that at least two of the populations have different distribution functions. In this work this test was used to test if the resulting 3 populations/clusters identified in the acoustic ADCP response have significantly different suspended sediment signatures (rejection of  $H_0$ ) (Maroco, 2007).

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

LISST grain size frequency distributions plotted for each individual cluster in both datasets showed that cluster analysis yielded in the identification of 3 distinct grain size populations in both datasets in terms of curve shape (Figure 1). To quantify this distinction, statistical characterization of each cluster via the mean and standard deviation was calculated for each considered LISST suspended sediment signature and resulting ADCP response.

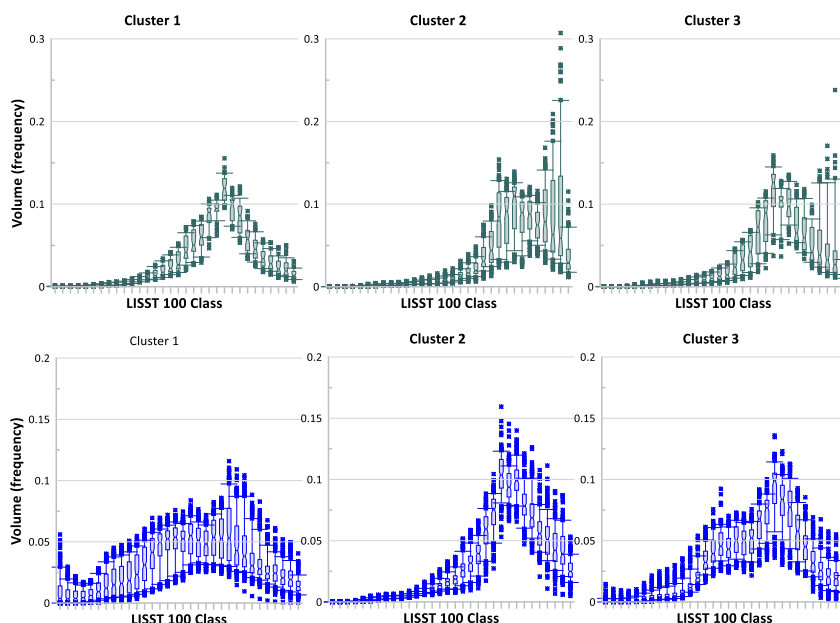


Fig. 1. Box-plot of LISST grain size distributions for each of the 3 identified populations by cluster analysis of the ADCP acoustic response (Top: Z. Piloto 2011; Bottom: C. da Caparica 2014)

Since all of the considered variables vary in time according to values in very different size scales, normalization was applied to all values in order to simplify the interpretation of the results. Table I and Figure 2 show that for each dataset 3 similar

populations could be identified: Population I: Characterized by higher than average ADCP  $I$  (acoustic intensity) response, higher than average sediment concentrations; lower than average mean grain diameters, sharper than average grain size curves and higher than average fine fraction ( $<62.5$

µm) content (Cluster 1 in the Z. Piloto 2011 dataset and Cluster 2 in the C. da Caparica dataset; Population 2: Characterized by lower than average ADCP I response, lower than average sediment concentrations; higher than average mean grain diameters, wider than average grain size curves and lower than average fine fraction (<62.5 µm) content (Cluster 2 in the Z. Piloto 2011 dataset and Cluster 1

in the C. da Caparica dataset); Population 3: Characterized by average ADCP I response, average sediment concentrations; average mean grain diameters, average width grain size curves and average fine fraction (<62.5 µm) content (Cluster 3 in the Z. Piloto 2011 dataset and C. da Caparica dataset).

Table I. Statistical characterization of total analysed datasets and each one of the identified clusters for normalized and real values. Negative normalized Means (µ) imply a lower than average real values (in red) and positive normalized µ (in green) imply higher than average real values. Normalized Means (µ) between -0.5 and 0.5 were considered neutral or close to average (in blue). Population I is shaded in orange; Population II in blue and Population III in green

	Z. Piloto - 2011				C. da Caparica 2014			
	Normalized Variable		Real Value		Normalized Variable		Real Value	
	µ	σ	µ	σ	µ	σ	µ	σ
ADCP I (dB)	0.00	1.00	82.78	7.56	0.00	1.00	81.94	4.11
SSC (kgm <sup>-3</sup> )	0.00	1.00	0.30	0.29	0.00	1.00	0.21	0.19
Mean D - VD (µm)	0.00	1.00	129.67	38.54	0.00	1.00	92.08	27.37
StDev - VD (µm)	0.00	1.00	38.66	5.42	0.00	1.00	37.45	4.93
Fine (freq.)	0.00	1.00	0.23	0.12	0.00	1.00	0.45	0.19

Cluster 1								
	µ	σ	µ	σ	µ	σ	µ	σ
ADCP I (dB)	1.61	0.45	94.95	3.43	-0.85	0.50	78.43	2.05
SSC (kgm <sup>-3</sup> )	0.57	0.97	0.46	0.28	-0.55	0.31	0.10	0.06
Mean D - VD (µm)	-0.91	0.38	94.54	14.55	0.99	0.58	119.13	15.78
StDev - VD (µm)	-0.75	0.66	34.62	3.59	0.59	0.77	40.35	3.81
Fine (freq.)	1.20	0.83	0.38	0.10	-0.99	0.36	0.26	0.07

Cluster 2								
	µ	σ	µ	σ	µ	σ	µ	σ
ADCP I (dB)	-0.76	0.30	77.08	2.28	1.01	0.60	79.00	2.45
SSC (kgm <sup>-3</sup> )	-0.28	0.88	0.22	0.26	0.88	1.07	0.37	0.20
Mean D - VD (µm)	0.61	0.90	153.22	34.69	-0.94	0.63	121.54	15.07
StDev - VD (µm)	0.57	0.87	41.78	4.58	-0.32	0.70	40.21	3.43
Fine (freq.)	-0.66	0.44	0.15	0.05	1.05	0.57	0.25	0.08

Cluster 3								
	µ	σ	µ	σ	µ	σ	µ	σ
ADCP I (dB)	0.04	0.32	83.05	2.45	-0.07	0.75	81.65	3.07
SSC (kgm <sup>-3</sup> )	0.03	1.03	0.30	0.30	-0.33	0.76	0.15	0.14
Mean D - VD (µm)	-0.37	0.81	116.81	29.80	-0.20	0.54	86.48	14.68
StDev - VD (µm)	-0.40	0.86	36.48	0.77	-0.43	0.91	35.35	0.54
Fine (freq.)	0.18	0.85	0.25	0.11	0.06	0.56	0.46	0.11

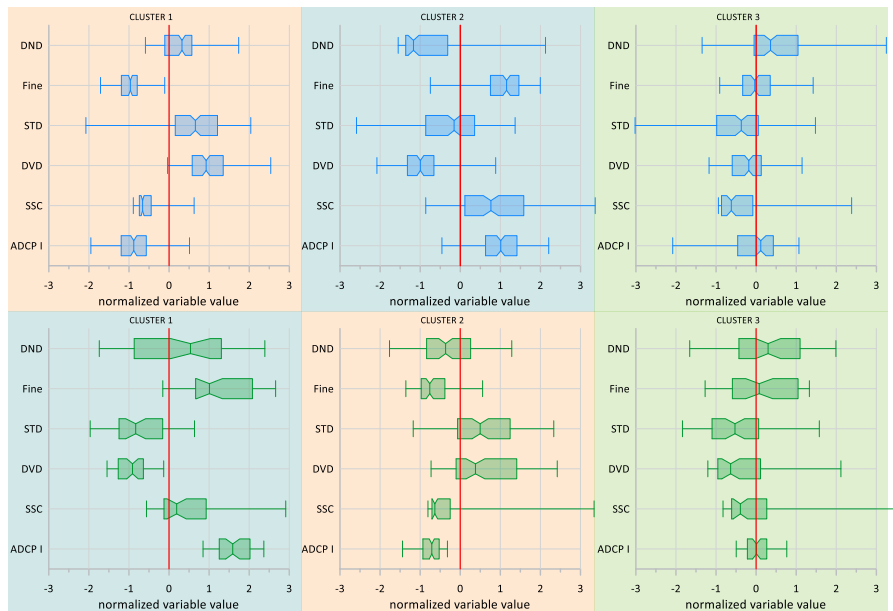


Fig. 2. Box-plot of normalized ADCP I response and LISST grain size signature variables. Population I is shaded in orange; Population II in blue and Population III in green. ADCP I – ADCP acoustic intensity; SSC – Suspended sediment concentration; DVD – Mean diameter for volume distributions; STD – standard deviation (shape of grain size distribution) for the volume distribution grain size curve; Fine – Fine fraction (<62.5 µm) frequency and DND – Mean diameter for number of particles distributions.

Kruskal-Wallis (KW) tests (Sigel, 1975; Maroco, 2007) were applied to the three populations identified by cluster analysis in the ADCP acoustic response, using “R” statistical software, to statistically prove that suspended sediment signatures are significantly different. In this test, a

Type I (α) error probability of 0.05 was used. Table II shows the results of the KW tests applied to both ADCP I and the suspended sediment variables reported by the LISST data. Both the normalized and real values show the exact statistical position which proves that manipulation of the variables had no

effect on the results. All tested populations show statistically significant populations (asymptotic significance=0 => H0 is rejected and the alternative hypothesis H1 is the most probable) for the ADCP I acoustic response in both datasets, proving that the cluster analysis was effective in separating 3 distinct

responses. Suspended sediment signature variables' tests also revealed that the separation of the 3 different acoustic response populations effectively corresponds to different suspended sediment signatures.

Table II. Results of Kruskal-Wallis tests applied to both ADCP acoustic response (ADCP I) and the suspended sediment signature variables independently measured by the LISST.

	Z. Piloto - 2011 (n=211)						C. da Caparica 2014 (n=433)					
	Normalized Variable			Real Value			Normalized Variable			Real Value		
	$\chi^2_{KW}$ (p<0.05)	df	Asymptotic significance	$\chi^2_{KW}$ (p<0.05)	df	Asymptotic significance	$\chi^2_{KW}$ (p<0.05)	df	Asymptotic significance	$\chi^2_{KW}$ (p<0.05)	df	Asymptotic significance
ADCP I (dB)	172.06	2	0	172.06	2	0	278.52	2	0	278.52	2	0
SSC (kgm <sup>-3</sup> )	50.38	2	0	50.38	2	0	158.57	2	0	158.57	2	0
Mean D - VD (µm)	101.68	2	0	101.68	2	0	309.43	2	0	309.43	2	0
StDev - VD (µm)	72.74	2	0	72.74	2	0	105.91	2	0	105.91	2	0
Fine (freq.)	103.20	2	0	103.20	2	0	330.61	2	0	330.61	2	0

#### 4. FINAL REMARKS

Sound waves passing through a water-sediment mixture will be scattered and attenuated as a function of sediment, fluid, and instrument properties (Landers, 2010). With this principle in mind, cluster analysis was applied to two different ADCP acoustic intensity time series in order to identify and separate different populations of acoustic response. These 3 populations were then characterized in terms of suspended sediment signature based on concurrent LISST measurements. Results showed that 3 statistically significantly different populations of suspended sediments could be identified in both datasets based solely on the statistical analysis of ADCP acoustic response.

In a near future this statistical analysis will be applied to ADCP data series where no suspended sediment grain size characteristics are available, in order to characterize sediment transport events not only in concentration terms but also in terms of grain size signature.

#### Acknowledgements

The authors greatly appreciate the operational support of Nuno Zacarias, Carlos Fernandes, Sandra Moreira, Rita Santos, Carlos Barata, Luis Santos, Luis Melo and the Andr meda and Auriga crews.

S. Pedro de Moel/Z. Piloto dataset was collected under the scope of the "Geophysical characterization of the Pilot Zone for Renewable Energy Experiments" financed by ENEONDAS, Energia das Ondas, S.A

Costa da Caparica dataset was collected under the scope of the IH-PT Environmental Characterization Project for the support of Naval Military Operations.

#### REFERENCES

Downing, A., Thorne, P. D., Vincent, C.E. (1995). Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. *Journal of the*

*Acoustical Society of America* 97.3 1614-1620. doi: 10.1121/1.412100

Gartner, J. W. (2004). Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211(3), 169-187. doi: 10.1016/j.margeo.2004.07.001

Gostiaux, L. and van Haren, H. (2010). Extracting meaningful information from uncalibrated backscattered echo intensity data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27 (5), pp. 943-949. doi: 10.1175/2009JTECHO704.1

Landers, M. N. (2010). Review of methods to estimate fluvial suspended sediment characteristics from acoustic surrogate metrics. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010

Maroco, João (2007) Análise Estatística, 3ª ed, Edi es S labo, Lisboa

Santos, A. I.; Oliveira, A.; Zacarias, N.; Pinto, J. P.; Ribeiro, M. (2014). Suspended sediment transport patterns on the inner shelf-S. Pedro de Moel (Portugal). *Journal of Sea Research*, Vol 93, pp.: 47-56. doi : 10.1016/j.seares.2014.04.009

Santos, A. I. (2016). Using ADCP Backscatter Data As A Proxy Of Suspended Sediments In The Water Column. Seminário de P s Gradua o I - Report done as part of the Advanced Training Course taken under the scope of the PhD in Geology, External Geodynamics, University of Lisbon, Faculty of Sciences

Siegel, Sidney (1975). Estatística n o-param trica (para as ciências do comportamento), São Paulo: McGraw Hill.

Thorne, P.D. and Hanes, D.M. (2002). A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 22, 603-632. doi: 10.1016/S0278-4343(01)00101 7

# Assessing the evolution of platform beaches: challenges and advancements

C. Ponte Lira (1,2), A. N. Silva (1,2), R. Taborda (1,2), C. Andrade (1,2),  
M. Carapuço (3), M. J. Faria (4)

- (1) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. Email to: fcilira@fc.ul.pt
- (2) Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa
- (3) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P.
- (4) Câmara Municipal de Cascais

**Abstract:** Platform beaches are small sand accumulations resting on a rocky platform, bounded landward by a cliff or artificial structure and extending seaward not far into the sea. Measuring long-term evolution of platform beaches is essential for an effective and sustainable coastal zone management, but can be challenging because coastline indicators (e.g. foredune/cliff toe) cannot be used and shoreline indicators are highly dependent on local water-levels. This work aims to explore unconventional ways to evaluate platform beach evolution, using Cascais beaches as a study-case. The study proposes an original methodology assess beach evolution, identifying the beach seaward limit, together with standard shoreline indicators. This approach provides objective indicators of beach configuration and volume, and is easily implemented using orthophotomaps.

**Key words:** platform beaches, beach evolution, indicators of change

## 1. INTRODUCTION

Studies on beach evolution are crucial to understand coastal dynamics, assess beach state and for an active and sustainable coastal zone management (Ponte Lira *et al.*, 2016). Nevertheless, the establishment of objective indicators to measure and evaluate beach evolution can be difficult to perform, due to the extremely dynamic nature of the beach systems. The work of Carapuço *et al.* (2016) has identified optimal indicators for shoreline/coastline evolution studies in low-lying sandy systems. However, platform beaches present peculiar challenges in terms of quantifying beach evolution.

### 1.1. Platform beaches - concept

Platform beaches are small accumulations of unconsolidated sand resting on a rocky platform (Fig 1). These beaches are usually landward limited by either a cliff or artificial structure and do not extend far into the sea. The landward limit of the beach is therefore static (cliff/structure). Additionally, and in the case of small and highly embayed beaches, the profile is usually straight, without the presence of a berm and the slopes are gentle. In a first approximation, platform beaches can be conceived as a prism of sand that, depending on sand sources and sinks, can grow into the sea, or recede towards the landward limit (cliff or structure) (Fig1 and Fig2).

### 1.2. Platform beaches – the challenge of performing beach evolution studies

Beach evolution studies should rely in measurements that are as independent as possible of high-frequency wave and tide induced water level changes. This constrain is particularly relevant in

systems with low evolution rates where the water levels uncertainty can overcome the signal associated with beach evolution. Therefore, in most cases, coastline position can be regarded as the optimal indicator to assess beach evolution (Carapuço *et al.*, 2016). Nonetheless, in the case of platform beaches, as the coastline is usually static, an alternative method is necessary.

### 1.3. Objectives

This work assesses the use of a standard shoreline indicator to evaluate platform beach evolution and compares the results with a new methodological approach developed in scope of the present analysis. The study is developed using, as study-case, some of the Cascais Municipality beaches. The methods, based on orthophotomaps, should provide objective indicators to measure beach position and to quantify beach volume.

## 2. STUDY AREA

The Cascais Municipality is an international recognized tourist destination, famous by its beaches, cultural value, mild climate and proximity to the country city-capital. Its coast is dominated by low-cliffs, with several embayed beaches. The southern coastal stretch is sheltered from the dominant NW wave regime, contrasting with the higher energetic regime that characterizes the western stretch, famous for surf and other sea/wind activities. This study focusses on the 12 highly artificialized embayed beaches of the southern sector. All beaches are backed either by artificial structures (Ribeira, Rainha, Conceição, Duquesa, Moitas, Tamariz, Poça, Azaruinha, S. Pedro do Estoril, Bafureira, and Parede) or cliffs (Avencas and S. Pedro do Estoril). Also, the beaches develop

over a low gradient shore platform, carved in sandstones and limestones (Taborda and Ribeiro, 2015). The geomorphological and socioeconomic settings make these beaches greatly visited by many beach users. Also, since this littoral is a sand deprived environment, these beaches have experienced changes in sand volume, affecting the beach capacity. All the above makes it an ideal case study for testing shoreline evolution methodologies for platform beaches.



Fig. 1. Example of Azarujinha platform beach. Top image is the beach in 2005 after a beach nourishment, and bottom image is the beach in 2017.

### 3. METHODS

#### 3.1. Shoreline indicators – platform beaches

To assess changes in beach volume and configuration position, this study proposes to use: 1) a new indicator represented the seaward beach limit, represented by the sand/rock limit – SRL and 2) the standard high-water line (HWL), taken as the position of the wet-dry sand line (WDL) which

represents the shoreline position. SRL indicator defines the offshore end of the beach (the lower limit of the sand prism – Fig.2), and HWL indicator, the shoreline position (as defined in Carapuço *et al.*, 2016). Both indicators are, typically, easily identified using orthoimagery.

#### 3.2. Data sources and mapping procedures

Digital orthophotomaps of the years 1999, 2000, 2005, 2008, 2009, 2010, 2013, 2015, 2016, 2017 covering the study area were used in the digitization process. The SRL and WDL were recognized and manually digitized in each dataset using a visualization scale between 1:800 and 1:1200.

#### 3.3. Beach evolution assessment

After the identification of each indicator for each individual date, two different measures were conducted (Fig.3): D1 – represents the distance between the coastline and the SRL indicator; and D2 - represents the distance between the coastline and the shoreline indicator (taken as WDL). Coastline in these cases is a static boundary represented by the LMPMAVE (Maximum line of equinoctial spring high tides). Both measures were calculated in a GIS environment using the ArcGIS extensions Digital Shoreline Analysis System (Thieler *et al.*, 2009) and the Coastline Change Mapper (Psuty *et al.*, 2010).

#### 3.4. Validation

Volumes of sand placed in each beach during the artificial nourishment works of May 2005 (Cascais, 2018) (Table I) can be used to validate beach evolution results presented in this study, as they clearly indicate an increase of beach volume for each beach. Furthermore, topographic measurements conducted in Tamariz and S. Pedro do Estoril in Spring/Summer of 2007 (Andrade *et al.*, 2007) were used to validate the position of SRL indicator for this year on these beaches.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

Fig.4 depicts beach evolution results using the proposed SRL indicator (in blue) in comparison with the traditional WDL indicator (in orange), for each of the 12 beaches included in the study. Results show that the two indicators exhibit a different behaviour suggesting that they are not mimicking the same processes. SRL results for beaches Tamariz and S. Pedro do Estoril are consistent with topographic measurements for year 2007.

To assess indicator performance, estimated evolution trends were compared with the expected beach evolution after a sand nourishment, performed in 2005 in 9 beaches (Table I). As the beach nourishment operation took place prior to the 2005 orthophoto, successful indicator performance was signalled by an increase of the indicator value between 2000 and 2005.

This comparison shows that the SRL indicator successfully measure an increase of beach volume at all nourished beaches whereas the WDL only show four positive matches.

Table 1. Volume of sand placed in each beach in year 2005 (Cascais, 2018) and the corresponding positive (y), negative (n), hindered (-) identification of the 2005 volume increment for each of the indicators (SRL and wdl) used in the study.

Beach	Volume (m <sup>3</sup> )	SRL	WDL
Duquesa + Conceição	7060	y	y
Moitas	15210	y	n
Tamariz	19273	y	y
Poça	3390	y	n
Azarujinha	5772	y	y
S. Pedro do Estoril	10601	y	n
Bafureira	1848	y	-
Parede	3192	y	y

This fact confirms what is already known for water level dependent type of indicators, which are especially susceptible to incident waves and tidal levels. Furthermore, when using orthoimagery, which is a snapshot of the beach system, such characteristic might be exacerbated. This major drawback of WDL indicator could be mitigated and corrected for the tide and runoff. Nevertheless, the new proposed SRL indicator can overcome this problem, thus suggesting being a more robust indicator.

Notwithstanding, SRL indicator is also not free of limitations. The first limitation is the state of the sea at the time of image acquisition. Because SRL measures the seaward position of the sand, along the beach profile (usually underwater), the water must be clear and without swell to allow mapping the indicator. This drawback hampered the SRL analysis for Rainha beach in years 2000, 2016 and 2017. Yet, such shortcoming could be mitigated if other measuring techniques are used, e.g. drone surveys where measuring campaigns can be planned for optimal conditions. Another shortcoming is the limit extension and shape. Sometimes, beaches extend far into the sea in some areas, preventing the use of aerial images to map the proposed indicator. Usually this means that there is a greater volume of sand available in the system, capable of covering the shore platform at greater distances. Although rare, this phenomenon can be observed at lower extent in some of Cascais beaches, mainly at Conceição and Duquesa central transects, where SRL position could not be mapped.

Nonetheless, lateral transects sufficed in assessing beach state.

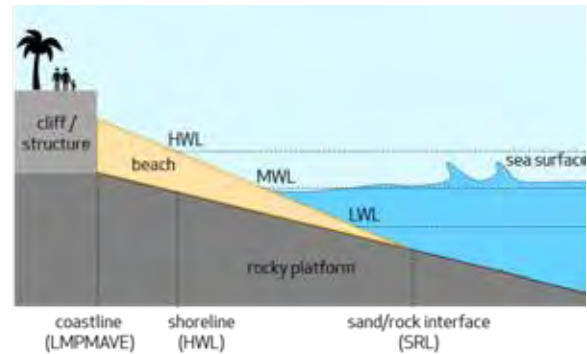


Fig. 2. Schematic profile view of platform beaches perceived as a sand prism and location of the beach evolution indicators.

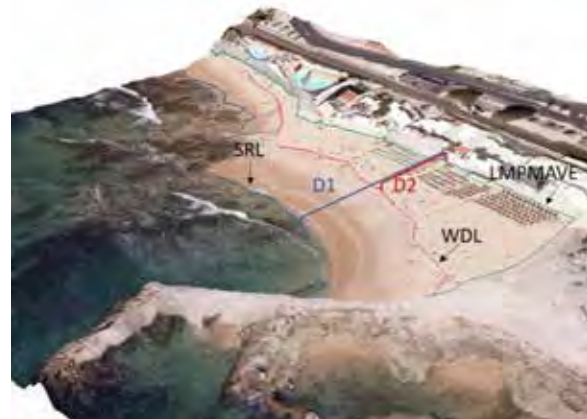


Fig. 3. 3D view of beach evolution indicators SRL – Sand/Rock Line; WDL – Wet/Dry line, LMPMAVE - Maximum line of equinoctial spring high tides and measurements (D1 - distance between the coastline and SRL; D2 – distance between coastline and WDL).

## 5. CONCLUSION

This work presents a new indicator to assess beach evolution of platform beaches supported on the Sand/Rock Line. This approach, which uses the beach offshore limit, is independent of short-term variation of the water levels and was shown to successfully evaluate the beach area. The technique can be easily applied to orthoimagery, or to images acquired with Unmanned Aerial Vehicles.

Furthermore, beach evolution results, here presented in the form of changes in distances to the coastline, can be simply transformed in beach volume using straight volume formulations (Taborda & Ribeiro, 2015).

## Acknowledgements

Authors would like to thank project Sistema de Informação Litoral para o Município de Cascais - SIL Cascais for the funding for this study.



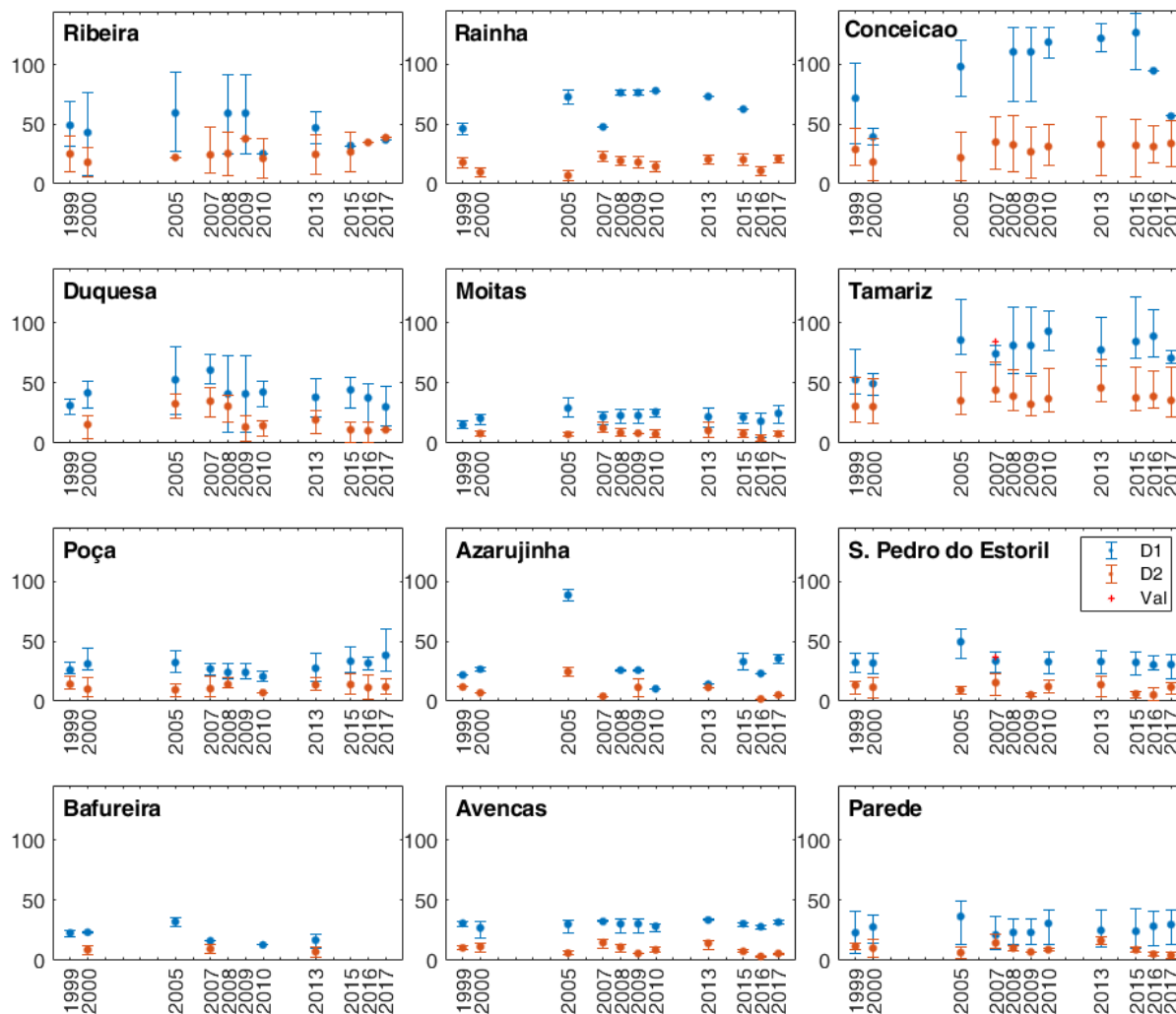


Fig. 4. Beach evolution results, for each beach included in the study, using the proposed Sand/Rock line (SRL) indicator – represented by D1 distance and the traditional Wet/Dry line (WDL) indicator – represented by the D2 distance. X axis represent years of the orthoimagery dataset and Y axis represents distance in meters (m) between indicator and coastline. Dot represents mean of all transects used in each beach and negative and positive values from the mean represent minimum and maximum results respectively. Val – are topographic measurements in 2007(Andrade et al., 2007).

## REFERENCES

- Andrade, C.F., Freitas, M.C., Taborda, R.P.M., Antunes, A., Figueiredo, P., Mendes, Telmo (2007) Estudo de Caracterização do Conteúdo Sedimentar e da Variabilidade Morfológica de Praias da Costa do Sol. FCUL, Agosto de 2007.
- Cascais (2018) – Obra de Alimentação Artificial das Praias da Costa do Estoril. Available online at <http://www.cm-cascais.pt/cascais/Print.aspx?guid={365BAF63-2935-4195-9C88-B49DC7F8BCB1}>
- Carapuço, M.M., Taborda, R., Silveira, T.M., Psuty, N.P., Andrade, C., Freitas, M.C. (2016) Coastal geoindicators: Towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments. *Earth-Science Reviews*, 154, 183–190.
- Ponte Lira, C., Silva, A.N., Taborda, R., and de Andrade, C.F. (2016) Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: an integrated approach, *Earth System Science Data*, 8(1):265-278.
- Psuty, N. P., Duffy, M., Pace, J. F., Skidds, D. E., and Silveira, T.M.: Northeast Coastal and Barrier Network geomorphological monitoring protocol: part I – ocean coastline position, Natural Resource Report NPS/NCBN/NRR – 2010/185, National Park Service, Fort Collins, Colorado, 2010.
- Taborda, R. and Ribeiro, M.A. (2015) A simple model to estimate the impact on sea-level rise on platform beaches. *Geomorphology*, 234:201-210.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., and Ergul, A.: Digital Coastline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating coastline change, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

# Caracterização sonográfica e geomorfológica através de um levantamento interferométrico no Canal da Barra da Lagoa (Florianópolis – SC – Brasil)

D. Carazzai(1), A. H. F. Klein(2), C. Monteiro(1), C.R.V. Marques(1).

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa, dcarazzai@gmail.com

(2) Laboratório de Oceanografia Costeira, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brasil

**Resumo:** No presente estudo foi realizado o levantamento batimétrico e sonográfico do Canal da Barra da Lagoa através de um sonar interferométrico. Os dados foram processados e analisados seguindo as metodologias e procedimentos em vigor no Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa, para verificar se satisfazem os requisitos mínimos definidos para os levantamentos hidrográficos, avaliando a consistência e a repetibilidade dos dados através de análise estatística das zonas de sobreposição entre fiadas adjacentes. Um modelo batimétrico de alta resolução foi gerado e a caracterização acústica do leito foi dada através da análise dos padrões de retroespalhamento e sua correlação com os diferentes tipos de substratos amostrados *in situ* via registro fotográfico. As formas de leito identificadas nos dados acústicos foram analisadas através de perfis transversais, apontando as respectivas configurações hidrodinâmicas em função de suas características.

**Palavras-chave:** Sonar interferométrico, Batimetria, Sonografia, Formas de Leito, Canal de maré

## 1. INTRODUÇÃO

As lagoas costeiras representam corpos de água interiores separados do oceano por uma barreira. No entanto, pode existir uma ligação ao Oceano através de um ou mais canais. Kjerve (1986) definiu a classificação das lagoas de acordo com as características de troca de água com o oceano costeiro em três tipos: sufocadas, restritas e vazadas.

As lagoas costeiras sufocadas apresentam-se na forma de células elípticas paralelas à linha de costa, conectadas ao oceano por um único canal longo e estreito e são associadas às regiões de costa com moderada a alta energia de ondas, deriva litorânea significativa, e regime de micro a mesomaré. Sua hidrodinâmica interior é normalmente dominada pela força do vento, e pela ação das marés ao longo do canal de conexão ao oceano. Embora as lagoas costeiras sofram variações no nível devido à co-oscilação da maré do oceano adjacente, o canal de entrada atua como um filtro dinâmico, atenuando as velocidades de corrente de maré e flutuações do nível em direção a desembocadura lagunar.

Importantes evidências e apontamentos a respeito da hidrodinâmica e do transporte sedimentar de ambientes aquáticos podem ser realizados através da investigação das formas do fundo sedimentar inconsolidado. Esse estudo mostrou ser uma ferramenta útil na estimativa e avaliação dos agentes físicos que deram origem a essas morfologias, tal como os padrões de transporte e sedimentação (Bouma et al, 1980; Wewetzer, 1999).

O uso de sonares interferométricos neste contexto tem como prerrogativa a resolução do imageamento do

fundo, garantindo a melhor interpretação dos dados, e ainda extrair a informação batimétrica através das diferenças de fase do sinal acústico recebido entre elementos do transdutor.

O presente estudo apresenta um modelo batimétrico de alta resolução do Canal da Barra da Lagoa, bem como a sua caracterização sonográfica, identificando os diversos tipos de sedimento que compõem o fundo marinho, em função das suas assinaturas acústicas. Em paralelo, as formas de leito identificadas pela interpretação dos dados acústicos e suas relações com a hidrodinâmica do canal são discutidas.

### 1.1. Área de estudo

A área de estudo (fig. 1) pertence ao sistema lagunar da Lagoa da Conceição, situada na porção leste da Ilha de Santa Catarina, litoral central do estado de Santa Catarina. O Canal da Barra da Lagoa é a única ligação com o oceano, caracterizando o sistema lagunar como do tipo sufocado. Possui 2,9 km de extensão com presença de meandros, uma largura média de 25 m e profundidade média de 2,5 m. A circulação da água no Canal da Barra é dominada pela força da maré, diferente da Lagoa da Conceição a qual é dominada pela ação do vento (Sierra de Ledo & Soriano-Sierra, 1999). A região está sujeita a um regime de micromaré mista com predominância semi-diurna, cuja amplitude é atenuada até 95% entre a desembocadura oceânica e lagunar, com uma defasagem de 3,5 h para preamar e de 1,5 h para baixamar e períodos de enchente menores que os de maré vazante (Pereira, 2004; Godoy *et. al.* 2008). Esse comportamento é típico de ambientes estuarinos e canais de maré, sendo efeito de processos não lineares advectivos e friccionais do canal e da

interação da maré com a geometria do mesmo (Lincoln & Fitzgerald, 1988).



Fig. 1. Representação geográfica da área de estudo com os quadros de ampliação da batimetria numerados.

Dragagens foram realizadas nos anos de 1954, 1955 e 1968, sendo a efetiva estabilização do canal dada pela construção do molhe na desembocadura e uma última dragagem realizada em 1985. Desde então o canal permanece estável quanto à sua sessão transversal.

## 2. METODOLOGIA

O levantamento hidrográfico do Canal da Barra da Lagoa foi realizado pelo sistema interferométrico Edgetech 4600 o qual opera na frequência de 540 kHz, instalado em uma estrutura fixa ao bordo da embarcação. Tendo em conta a geometria do canal, foram definidas duas fiadas de aquisição dos dados ao longo das quais foram obtidos perfis de velocidade do som na água para correção das sondas. A redução das sondas, foi determinada através dos dados maregráficos adquiridos por duas estações, que mediram a variação do nível do mar na desembocadura lagunar e oceânica. Estes dados foram referenciados à rede geodésica do IBGE e utilizado como datum vertical o nível médio determinado através dos dados dos marégrafos adquiridos durante dois anos. Ao longo do canal as séries foram linearmente interpoladas.

A aquisição e processamento dos dados batimétricos foram realizados no módulo HYSWEEP do software Hypack, enquanto o imageamento foi processado no software SonarWiz 5. . A avaliação da consistência e a repetibilidade dos dados foi efetuada com recurso aos softwares Caris Base Editor v.4.0 e Caris Hips and Sips v9.0 sobre a nuvem de pontos validados anteriormente no HYSWEEP, seguindo no aplicável, as metodologias e procedimentos em vigor no Instituto Hidrográfico, através de análise estatística das zonas de sobreposição entre fiadas adjacentes e das camadas de informação das respectivas superfícies. Para tal, foram criados modelos batimétricos (MB) com diferentes resoluções a partir das fiadas individuais. Foram analisados qualitativamente os respectivos MB e identificados artefactos e zonas críticas, provenientes do sistema interferométrico. Estes artefactos não foram identificados na primeira interpretação dos dados.

As morfologias do leito identificadas na superfície batimétrica e na sonografia foram analisadas e classificadas segundo as especificações de Ashley (1990). Da batimetria foram extraídos perfis transversais à direção de migração das feições para melhor identificação de seus principais atributos, são eles: (1) altura; (2) comprimento; (3) forma e (4) direção de migração.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A interpretação e análise dos dados tratados foi efetuada através do modelo batimétrico gerado, dos padrões de retroespalhamento, auxílio do registro fotográfico e reconhecimento em campo.

### 3.1 Batimetria

A profundidade média calculada do canal é de 2,28m, com valores máximo e mínimo de 7,34m e 1,03m, respectivamente. As regiões onde foram identificadas as maiores profundidades (Quadro 1 e 3 da Fig. 2) correspondem aos trechos onde existe uma redução da largura do canal de escoamento, o que implica um aumento da velocidade das correntes de fundo, aumentando a erosão do fundo marinho, contudo as diversas alterações do fundo verificadas em anos anteriores em termos de dragagem devem ser consideradas.

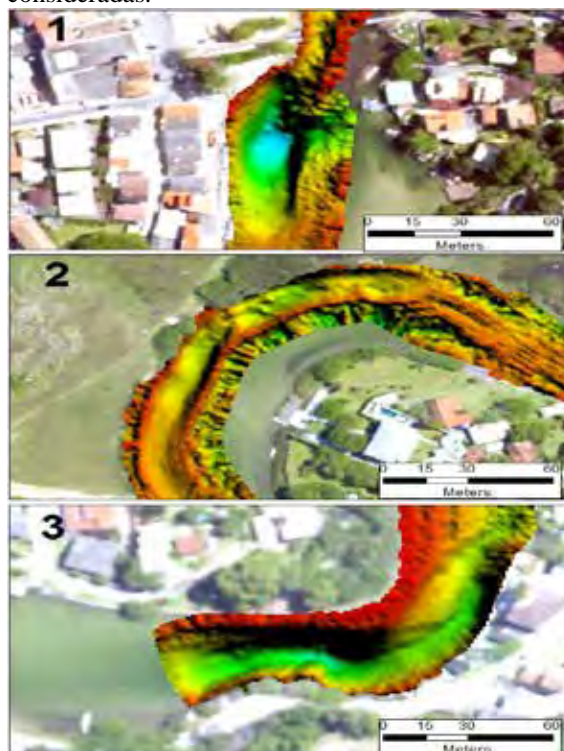


Fig. 2. Ampliação de três regiões da batimetria do Canal da Barra da Lagoa. A localização está representada na Fig. 1.

As menores profundidades foram verificadas na parte interna dos meandros através do reconhecimento *in situ*, sendo estas zonas caracterizadas por deposição de sedimentos em sistemas fluviais. Os dados acústicos nestas áreas (quadro 2 da Fig. 2) não tiveram qualidade suficiente dada a razão entre o sinal e o ruído, de modo que valores de profundidade de

referência aproximados são da ordem de dezenas de centímetros a 1 metro.

Pela análise da Fig. 3, podemos identificar claramente o eixo da fiada (indique na figura, através de uma seta, a localização do eixo) pela continuidade da ausência de informação e respectivos erros longitudinais paralelos ao eixo (indique na figura), que correspondem a artefatos gerados pelo sistema de sondagem e não a estruturas reais, semelhante ao que foi reportado por Hiller (2012). Nesse trabalho (Hiller, 2012), esses erros são atribuídos ao efeito de multitrajeto (explique a origem dos multitrajeto). A largura da fiada, neste trecho, é de X metros, que corresponde a cerca de 10 vezes a profundidade média do fundo, embora apresente muitas zonas de sombra.

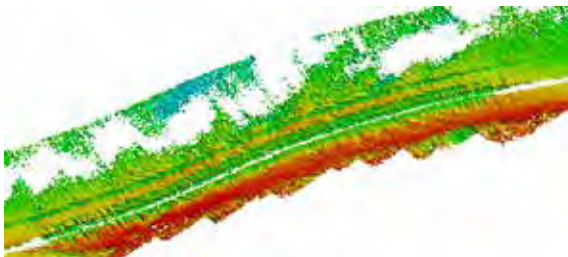


Fig. 3. Modelo batimétrico de 25 cm de resolução, camada de informação da profundidade, construído apenas com os dados validados de uma só fiada.

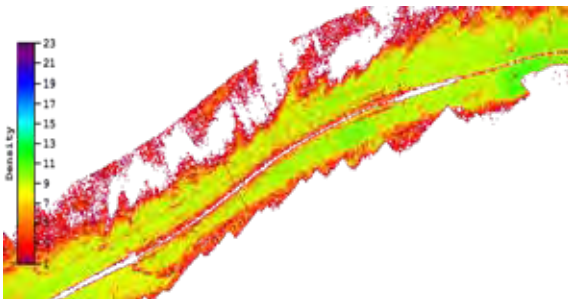


Fig. 4. Modelo batimétrico de 25 cm de resolução, camada de informação densidade, A densidade de dados para esta resolução é, em média, de 6 medições por nodo.

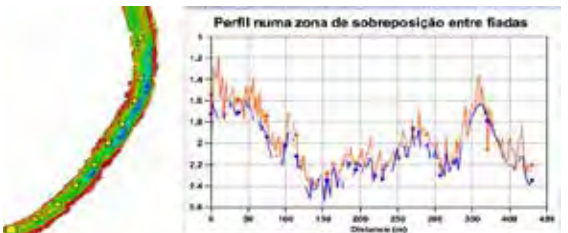


Fig. 5. Perfil efetuado no centro do canal, numa zona de sobreposição entre fiadas, As profundidades (m) estão representadas na vertical.

As grandezas estatísticas da superfície de diferenças, na zona de sobreposição entre fiadas, revelam uma média de -0,2 m e um desvio padrão de 0,2m. Na impossibilidade de abrir os dados, devido a incompatibilidade de formatos, não é possível classificar o levantamento em função das ordens da S-44 (OHI, 2008). No entanto face aos valores anteriores e reprocessando os dados de forma mais criteriosa, nas zonas críticas pressupõe-se que seria possível classificar o levantamento com ordem 1a.

### 3.2 Sonografia

Através da análise dos sonogramas do canal da Barra da Lagoa, foram identificadas diferentes assinaturas acústicas para os diversos substratos que compõem seu leito. A caracterização sonográfica do canal foi determinada por uma seleção de alvos que representam os tipos de feições acústicas e formas de leito previamente localizadas. As estruturas antrópicas (Fig. 6) dispostas por toda margem do canal são facilmente identificadas pelo distinto padrão de refletividade em relação ao meio natural. Pela confirmação do padrão de retroespalhamento, com a análise granulométrica e registro fotográfico, o domínio sedimentar do fundo do canal apresenta-se relativamente homogêneo com predominância de sedimentos arenosos de granulometria fina e média. Nos sonogramas também foram identificados locais pontuais com acumulação de cascalho (Fig. 7b).

Na investigação das formas de leito do canal torna-se útil a prerrogativa do uso do sonar interferométrico sobre a aquisição simultânea de dados batimétricos e sonográficos de alta resolução. Algumas feições que não foram possíveis de serem visualizadas no sonograma, tiveram um bom detalhamento morfológico na MB. E da mesma forma, algumas feições como as *ripples* sobre o campo dunar (Fig. 7a) foram identificados somente na sonografia. A geometria do canal explica a omissão de alguns campos de dunas nos sonogramas, por ser estreito e extremamente raso, em muitos locais a incidência do feixe acústico dá-se sobre ângulos praticamente normais ao transdutor, sendo estes ângulos elevados, ou seja, pouco oblíquos para esta técnica operar com resultados satisfatórios, dificultando a presença de contrastes e sombras nas imagens.

### 3.3 Formas de leito

As formas de leito captadas pela resolução do modelo batimétrico e do imageamento foram dunas cujas alturas variaram entre 10 e 60cm e comprimento de 5 à 30 metros. Através do registro fotográfico *in situ* das feições, pôde-se identificar marcas onduladas (*ripples*) sobre as dunas, caracterizando-as como do tipo compostas. Na zona mais a montante do canal foram identificados três campos de dunas com alturas entre 15 e 60 cm (mostre um perfil das dunas, onde seja visível as dimensões: altura e comprimento), comprimento de 7 à 14 m, forma assimétrica e orientação na direção das correntes unidirecionais de maré enchente. Seguindo os critérios propostos por Ashley (1990), essas dunas são classificadas de tamanho médio e, dadas as observações de *ripples* sobre as faces suaves das dunas na sonografia e imagens fotográficas, tratam-se de dunas compostas. Na zona central da extensão do canal foi observado um campo de dunas pequenas também com forma tridimensional assimétrica, porém com orientação contrária, na direção da maré vazante. Poucos metros à frente foram identificadas as únicas dunas simétricas ao longo do canal, com dimensões

semelhantes às anteriores sugerindo um equilíbrio em termos residuais das correntes unidirecionais no local. Na zona da desembocadura, foram verificadas dunas pequenas com altura de 20 cm e comprimento de 5 metros, orientadas com as correntes de maré vazante.

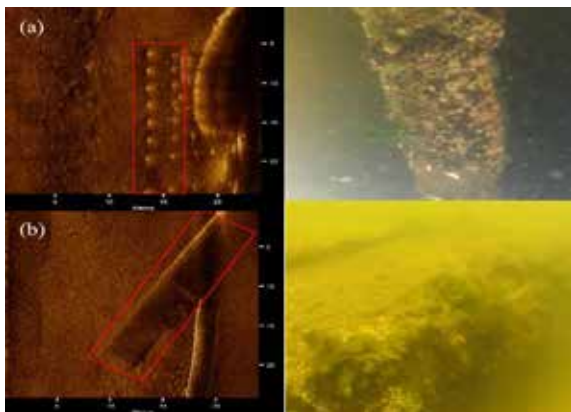


Fig. 6. Imagens dos alvos selecionados nos sonogramas e respectivo registro fotográfico. Pilastras de um píer nas imagens superiores e uma rampa de embarcações nas abaixo.

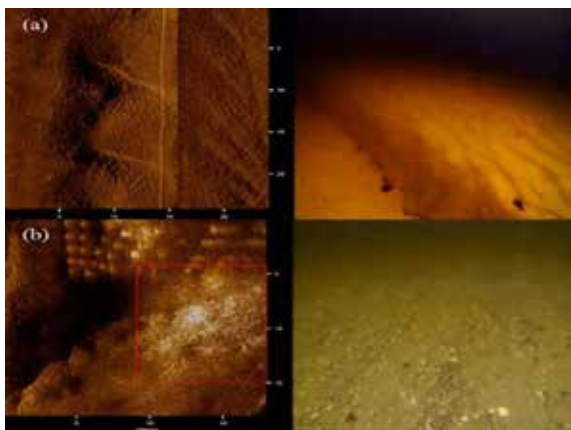


Fig. 7. Dunas na imagem superior e sedimentos compostos por cascalho abaixo.

Uma característica comum de lagoas costeiras do tipo sufocada é o menor período de maré enchente em relação à vazante, maiores velocidades de corrente nesta condição e o transporte de sedimentos com formação de um delta de enchente no sistema lagunar. Na comparação dos campos de dunas observados, esse comportamento é corroborado pelo maior número de ocorrências e dimensão das dunas orientadas na direção da maré enchente. As observações feitas por Pereira (2004) da direção e velocidade das correntes, em termos médios e máximos, de fato confirmam este cenário. No entanto a presença de dunas com orientação de maré vazante, na zona central e a jusante, por si só revelam que tal regime seja variável e dependente de mais fatores ambientais além do fluxo unidirecional de corrente proveniente da maré astronômica, a exemplo do regime hidrológico na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição e sua contribuição na componente da descarga fluvial do canal, e maré meteorológica.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

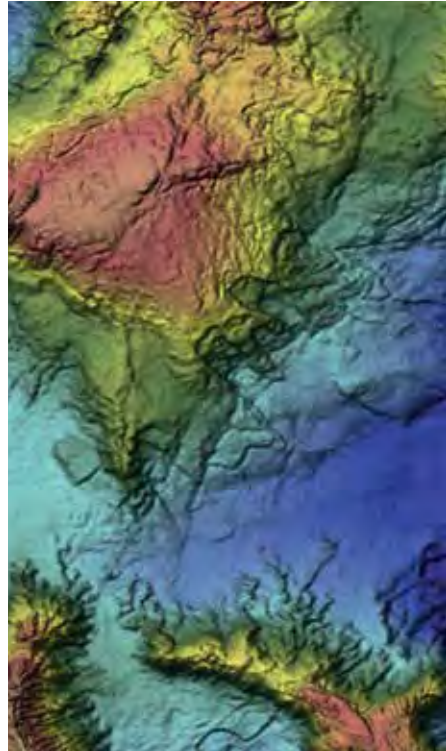
As imagens do sonar lateral mostraram a variedade de estruturas, substratos, ecofáceis e formas de leito através dos padrões de retroreflexão. A batimetria produzida pelo sonar interferométrico apresentou um bom nível de detalhamento, sendo capaz de identificar pequenas feições centimétricas. As formas de leito estiveram em conformidade em termos de suas configurações relativas às velocidades e direção residual de corrente medidas em trabalho anterior (Pereira, 2004). Recomenda-se o estudo complementar com levantamentos de acompanhamento da taxa de migração das dunas e o transporte de sedimentos no canal.

#### REFERÊNCIAS

- Ashley, G. M. (1990). "Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem." *Journal of Sedimentary Research* 60.1, p. 160-172.
- Bouma H. A., Rapoport L. M., Orlando C. R., Hampton A.M. (1980). Identification of bedforms in lower cook inlet, Alaska, *Sedimentary Geology*, Volume 26, Cap. 1-3, p.157-177.
- Godoy, F. B., Mario, H. F. S, Franco, D. (2008). O canal da Barra da Lagoa, Florianópolis – SC – um filtro de maré natural. Laboratório de Hidráulica Marítima - UFSC. *Anais III SEMENGO – Seminário de Engenharia Oceânica*, Rio Grande, RS.
- Hiller, T., Brisson, L.N., Wright, S. (2012). Measuring Bathymetric Uncertainty of the EdgeTech 4600 Sonar. In: *Hydro12 - Taking care of the sea*. Rotterdam.
- Lincoln, J. M., and Fitzgerald, D. M. (1988). Tidal distortions and flood dominance at five small tidal inlets in Southern Maine. *Marine Geology* 82, p. 133-148. 1988.
- Kjerfve, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. pp. 63-81. In *Estuarine Variability* (Wolfe D. A., ed.). Academic Press, New York, U.S.A., pp. 63-81. 1986.
- Pereira, M. L. M.: Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC. Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.
- Schubel, J.R. & Carter, H. H., 1984. Fine-grained Suspended Sediment. in: Kennedy v.s. (Ed.). *The estuary as a filter*. Orlando, Academic Press, INC., pp. 81-105.
- Sierra de Iedo, B. & Soriano-sierra, E.. Atributos e processos condicionantes da hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina.. O ecossistema da Lagoa da Conceição. NEMAR/CCB/UFSC. Florianópolis, Brasil: 89-100. 1999.
- Wewetzer S. F. K. Side-scan sonar mapping of bedforms in the middle Tay Estuary, Scotland. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 20, Cap. 3, 1999.

# OCEANOGRAFIA QUÍMICA

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA





# Monitorização de metais em sedimentos: Abordagens de avaliação da incerteza de medição

V. Morgado (1)(2), C. Palma (1) e R. B. Silva (2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa. E-mail: [vanessa.morgado@hidrografico.pt](mailto:vanessa.morgado@hidrografico.pt)

(2) Centro de Química Estrutural da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Campo Grande, 1749-016 Lisboa.

**Resumo:** As dragagens de sedimentos são essenciais para manter a navegação nos portos. Os sedimentos extraídos podem ter diversas aplicações em função da sua contaminação. A Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho tem procedimentos desenvolvidos para a determinação de metais em sedimentos por espectrometria de absorção atómica. Neste contexto, os procedimentos de medição devem ser validados para verificar se as suas medições são adequadas ao fim em vista. No âmbito da validação de um procedimento de medição, é imprescindível uma avaliação metrológica de determinados requisitos, a qual confere um veredicto relativamente à adequabilidade do procedimento e à qualidade das suas medições. Neste trabalho, o estudo de validação envolveu a avaliação da incerteza de medição seguindo diversas abordagens. Os resultados obtidos evidenciaram estimativas de incerteza de medição inferiores a um valor alvo definido de 25 %, pelo que os procedimentos de medição demonstraram ser adequados à monitorização de metais em sedimentos.

**Palavras-chave:** Sedimentos, Espectrometria de Absorção Atómica, Metais Pesados, Incerteza de medição.

## 1. INTRODUÇÃO

As dragagens efetuadas em locais predefinidos do rio Tejo têm por objetivo melhorar as condições de navegação e subaquáticas (Bray e Cohen, 2010). Consequentemente, os sedimentos dragados podem ser diversificadamente aplicados, por exemplo, na recarga de praias (Portaria nº 1450). Contudo, é importante ter em conta que os sedimentos dragados possam sofrer de algum grau de contaminação, destacando a contaminação por metais pesados, como o arsénio (As), cádmio (Cd), níquel (Ni) e chumbo (Pb). Tendo em consideração os potenciais efeitos adversos com origem na toxicidade e bioacumulação destes elementos químicos, é extremamente importante e indispensável a monitorização destes recursos antes da sua utilização, garantindo a sua adequabilidade ao objetivo.

A obtenção de resultados credíveis e adequados ao fim a que se destinam envolve a definição de requisitos analíticos e demonstração científica de que o desempenho do procedimento de medição, nas condições em que está a ser aplicado, se adequa ao seu propósito. Esta avaliação envolve um tratamento metrológico da informação que inclui a avaliação de uma série de parâmetros, nomeadamente a incerteza de medição.

Um valor expresso com incerteza fornece informação objetiva sobre a sua qualidade. A avaliação da incerteza de medição consiste num tratamento estatístico e metrológico do processo de

medição, o qual engloba a quantificação e combinação das fontes de incertezas que afetam a melhor estimativa da mensuranda. Função da informação base utilizada para a quantificação da incerteza de medição, surgem diferentes abordagens de avaliação. Este trabalho envolveu a estimativa e avaliação da incerteza de medição segundo as abordagens propostas pelos guias Eurachem e Nordtest e a abordagem Diferencial.

## 2. ABORDAGENS

### 2.1. Abordagens Eurachem e Nordtest

Os guias Eurachem (Ellison e Williams, 2012) e Nordtest (Magnusson *et al.*, 2012) propõem abordagens simplistas sobre a quantificação da incerteza de medição de métodos analíticos mesmo quando estes são complexos, como é o caso da determinação de metais pesados em sedimentos por espectrometria de absorção atómica (EAA). Estas abordagens baseiam-se na divisão das componentes de incerteza naquelas que podem ser isoladas em dois parâmetros do desempenho global de medição: a precisão e a veracidade (Fig. 1).

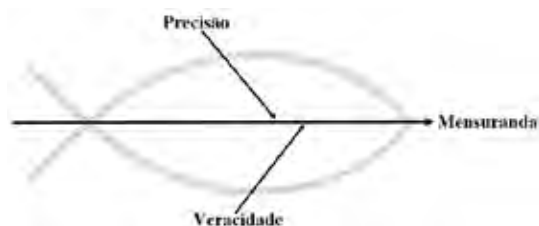


Fig. 1. Identificação das fontes de incerteza consideradas na aplicação das abordagens Eurachem e Nordtest.



Deste modo, a incerteza padrão relativa combinada,  $u'$ , estimada por estas abordagens, é dada pela seguinte equação que combina as incertezas padrão relativas da precisão ( $u'_{\text{precisão}}$ ) e da veracidade ( $u'_{\text{veracidade}}$ ) que refletem os efeitos aleatórios e sistemáticos que afetam a medição, respetivamente:

$$u' = \sqrt{(u'_{\text{precisão}})^2 + (u'_{\text{veracidade}})^2}$$

Apesar de ambas as abordagens seguirem metodologias de avaliação semelhantes, distinguem-se pela forma como estimam a incerteza associada à veracidade de medição. A abordagem proposta pelo guia Eurachem avalia a relevância metrológica dos efeitos sistemáticos que afetam os resultados de medição através de um teste estatístico de *t-student*. Noutra perspetiva, o guia Nordtest propõe que os efeitos sistemáticos sejam incluídos na estimativa da incerteza de medição, rejeitando a avaliação de significância destes desvios.

## 2.2. Abordagem diferencial

A abordagem diferencial (Silva *et al.*, 2000) é uma abordagem pragmática que integra as vantagens das abordagens supramencionadas e de outra abordagem mais detalhada – abordagem subanalítica - para estimar a incerteza de medição, permitindo obter informação sobre as contribuições percentuais de cada etapa analítica, incluindo as etapas complexas. Esta abordagem baseia-se na divisão das componentes de incerteza em associadas a etapas analíticas simples ( $u'_{\text{simples}}$ ) e complexas ( $u'_{\text{complexa}}$ ), que afetam a precisão de medição, e na incerteza associada à veracidade ( $u'_{\text{veracidade}}$ ) de medição (Fig. 2).



Fig. 2. Identificação das fontes de incerteza consideradas na aplicação da abordagem diferencial. (S) – Fonte de incerteza simples; (C) – Fonte de incerteza complexa.

A equação seguinte traduz a forma como as componentes identificadas são combinadas produzindo a incerteza padrão relativa combinada:

$$u' = \sqrt{(u'_{\text{simples}})^2 + (u'_{\text{complexa}})^2 + (u'_{\text{veracidade}})^2}$$

Neste estudo, as etapas analíticas simples incluíram as pesagens, medições de volumes e a quantificação instrumental, e a etapa complexa correspondeu à digestão (extração) dos metais da amostra.

A incerteza associada à veracidade foi estimada de forma semelhante ao descrito no Guia Eurachem.

## 3. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho refletem o estudo de um conjunto de amostras para os quatro elementos químicos: As, Cd, Ni e Pb, segundo dois procedimentos distintos de extração dos metais para solução e respetiva quantificação por espectrometria de absorção atômica com chama e com gerador de hidretos para o As. Os procedimentos de digestão distinguem-se pelo vigor da extração do metal do sedimento. Na digestão parcial (P) somente os metais que se encontram na camada superficial do sedimento são removidos, ao passo que na digestão total (T) a matriz do sedimento é destruída e os metais que lhes são intrínsecos são também determinados.

A Tabela I reúne os dados calculados das incertezas padrão relativas ( $u'$ ) das componentes de incerteza identificadas na Fig. 1 para as abordagens Eurachem e Nordtest.

Tabela I. Incertezas padrão relativas das componentes de incerteza estimadas pelas abordagens Eurachem e Nordtest.

Metal	Dig.	$u'_{\text{precisão}}$ (%)	$u'_{\text{veracidade}}$ (%)	
			Eurachem	Nordtest
As	T	4,04	2,47	5,36
	P	4,68	1,65	5,05
Cd	T	9,05	3,31	6,62
	P	9,75	3,38	3,53
Ni	T	7,10	1,17	8,53
	P	6,87	1,28	5,74
Pb	T	5,54	1,57	5,31
	P	6,29	1,24	4,24

Na Tabela II estão apresentados os dados calculados das incertezas padrão relativas ( $u'$ ) das componentes de incerteza identificadas na Fig. 2 segundo a abordagem diferencial.

Tabela II. Incertezas padrão relativas das componentes de incerteza estimadas pela abordagem diferencial.

Metal	Dig.	$u'_{\text{simples}}$ (%)	$u'_{\text{complexa}}$ (%)	$u'_{\text{veracidade}}$ (%)
As	T	1,20	3,07	2,46
	P	1,27	3,62	1,65
Cd	T	3,17	5,81	3,31
	P	3,10	6,98	3,38
Ni	T	1,18	4,62	1,17
	P	1,09	5,53	1,28
Pb	T	1,82	4,49	1,57
	P	1,71	5,42	1,24

Com base nos dados das Tabelas I e II, e após aplicação das equações descritas para o cálculo das incertezas padrão combinadas de cada abordagem, apresenta-se na Tabela III os resultados da análise do mesmo material de referência certificado (MRC). São apresentados resultados da análise de vários elementos incluindo a respetiva incerteza expandida ( $U'$ ) para um nível de confiança de 95 % ( $k = 2$ ).

consumo humano (UE, 2015), justificado pelo facto do controlo de qualidade das águas de consumo humano ser mais restrito que o controlo da contaminação de sedimentos.

Como se pode verificar, com base nos dados apresentados na Tabela III, todas as determinações têm uma incerteza expandida menor que o valor alvo

Tabela III. Resultado da análise do MRC expresso com incerteza, segundo as abordagens estudadas.

Metal	Digestão	Diferencial		Eurachem		Nordtest	
		Resultado (mg kg <sup>-1</sup> )	$U'$ (%)	Resultado (mg kg <sup>-1</sup> )	$U'$ (%)	Resultado (mg kg <sup>-1</sup> )	$U'$ (%)
As	TOTAL	(23,9 ± 2,0)	8,2	(23,9 ± 2,3)	9,5	(22,4 ± 3,0)	13,4
	PARCIAL	(21,3 ± 1,8)	8,4	(21,3 ± 2,1)	9,9	(19,3 ± 2,7)	13,8
Cd	TOTAL	(1,90 ± 0,28)	14,8	(1,90 ± 0,37)	19,3	(1,90 ± 0,43)	22,4
	PARCIAL	(1,98 ± 0,33)	16,7	(1,98 ± 0,41)	20,6	(1,98 ± 0,41)	20,7
Ni	TOTAL	(52,2 ± 5,1)	9,8	(53,2 ± 7,5)	14,4	(46 ± 10)	22,2
	PARCIAL	(57,0 ± 6,6)	11,6	(57,0 ± 8,0)	14,0	(52,4 ± 9,4)	17,9
Pb	TOTAL	(68,0 ± 6,9)	10,2	(68,1 ± 7,8)	11,5	(64 ± 10)	15,3
	PARCIAL	(74,4 ± 8,7)	11,6	(74,5 ± 9,5)	12,8	(70 ± 11)	15,2

A avaliação dos valores de incerteza obtidos e a decisão quanto à sua adequação ao uso foi baseada na comparação com um valor de incerteza alvo (Silva, 2013). Uma vez que na literatura ainda não se encontra definido um valor alvo para a incerteza da determinação de metais em sedimentos, para este estudo estabeleceu-se uma incerteza expandida relativa alvo de 25 % (Silva e Williams, 2015). Este valor foi definido com base nos valores regulamentados na Diretiva n° 2015/1787 da Comissão de 6 de outubro de 2015 para a monitorização da qualidade da água destinada a

de incerteza. Em todas as determinações, a abordagem Diferencial estima os menores valores de incerteza e a abordagem Nordtest as estimativas mais pessimistas da qualidade das medições.

Os resultados estimados de metais são metrologicamente compatíveis com os valores de referência do Material de Referência provando a qualidade das estimativas de incerteza.

Considerando que todos os valores estimados são adequados ao fim a que se destinam, foram estimadas as contribuições percentuais das fontes de

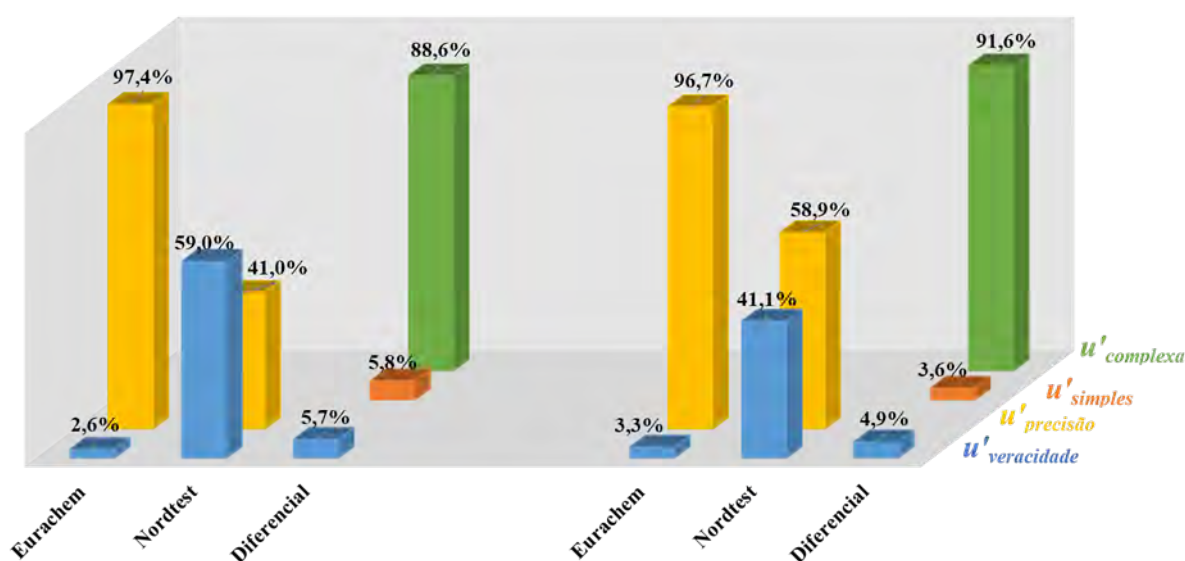


Fig. 3. Contribuição percentual das fontes de incertezas identificadas em cada abordagem estudada, de acordo com as Fig. 1 e 2.

incerteza de cada abordagem. A Fig. 3 apresenta as contribuições percentuais para cada abordagem considerando as respetivas fontes de incerteza (Figs. 1 e 2).

#### 4. CONCLUSÕES

Com o propósito de apresentar diferentes abordagens de avaliação da incerteza de medição de metais em sedimentos por EAA e de comparar as incertezas por elas estimadas conclui-se que:

- i) as incertezas de medição são majoradas quando estimadas pelas abordagens Eurachem e Nordtest, sobretudo por esta última;
- ii) a abordagem Diferencial estima valores inferiores de incerteza, uma vez que contabiliza todas as componentes de incerteza isoladamente evitando a repetição da sua contabilização.
- iii) a abordagem diferencial permite estimar a contribuição percentual de todas as componentes de incerteza. Assim, identificou-se que a componente de digestão é a componente maioritária de incerteza;
- iv) uma vez que as incertezas expandidas estimadas por todas as abordagens são inferiores ao valor máximo alvo de 25 %, os procedimentos de medição provam ser adequados à monitorização dos elementos As, Cd, Ni e Pb em sedimentos.

#### REFERÊNCIAS

- Bray, N., Cohen M. (2010). *Dredging for development*. International Association of Dredging Companies (IADC) & International Association of Ports and Harbors (IAPH) (eds.), 6<sup>a</sup> ed.
- Ellison S. L. R., Williams A. (2012). *Eurachem/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement* (eds.), 3<sup>a</sup> ed.
- Magnusson B., *et al.* (2012). Nordtest technical report - Handbook for Calculation of Measurement Uncertainty in Environmental Laboratories, TR 537 ed. 3.1.
- Portaria n<sup>o</sup> 1450/2007 de 12 de novembro do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, *Diário da República*, 1<sup>a</sup> série - n<sup>o</sup> 217/2007.
- Silva R. (2013). Setting Target Measurement Uncertainty in Water Analysis. *Water*, 10-5, 1279-1302.
- Silva R. B. *et al.* (2000). Assessment of the determination of heavy metals in organic soil improvers by ICP-OES. *Analyst*, 125, 1459-1464.
- Silva R. B., Williams A. (2015). *Eurachem/CITAC Guide: Setting and Using Target Uncertainty in Chemical Measurement* (eds.), 1<sup>a</sup> ed.
- UE, Regulamento n<sup>o</sup> 2015/1787 de 6 de outubro da Comissão, *Jornal Oficial da União Europeia*, 2015.

## Qualidade da água no baixo estuário do rio Arade – comparação verão *versus* inverno seco

C. Correia (1), A. Rosa (1), A. Cravo e J. Jacob (1)

(1) CIMA, FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal. ccorreia@ualg.pt

**Resumo:** Os estuários representam sistemas de transição entre ambientes de água doce e marinhos, reconhecidos como sistemas produtivos do ponto de vista biológico. Estes são também sistemas muito procurados pelo Homem e como tal são afetados por pressão antropogénica. O rio Arade é o segundo rio mais importante da costa algarvia e a pressão antropogénica é mais evidente no verão pela maior afluência turística. Este trabalho pretende contribuir para melhorar a compreensão da variabilidade das propriedades físicas e químicas no estuário do Arade em épocas extremas: fim de verão (setembro 2015) e inverno seco (janeiro 2018). Os dados recolhidos durante ambos os ciclos de maré completos (~ 13h) numa secção do baixo estuário mostram concentrações mais elevadas no inverno. Ao longo da secção, a margem direita é a que sofre maiores alterações de qualidade de água. Tal facto pode estar associado à maior influência da descarga da ETAR perto do local estudado.

**Palavras-chave:** Rio Arade, baixo estuário, nutrientes, clorofila *a*, sólidos em suspensão.

### 1. INTRODUÇÃO

Os estuários são ecossistemas produtivos, sensíveis a alterações ambientais e estão frequentemente sujeitos a várias pressões antropogénicas (associadas ao crescimento populacional e desenvolvimento socioeconómico). Como consequências de alterações climáticas, os eventos de cheias e secas estão a aumentar em todo o mundo e podem causar uma série de impactos (Fernandino *et al.*, 2018), o que torna estes sistemas particularmente vulneráveis a eventos extremos. Torna-se assim fundamental compreender as alterações climáticas que começam a afetar o nosso planeta, nomeadamente alterações a nível de temperatura, disponibilidade de água doce e escoamento fluvial, precipitação (por ex. inundações e secas extremas) (Gleick, 2003; Mirza, 2003).

O conhecimento dos mecanismos de resposta dos ecossistemas estuarinos ao fluxo de água doce pode fornecer informações importantes para perceber a dinâmica desses ecossistemas-chave, bem como a sua sensibilidade à intervenção humana e à variabilidade climática (Marques *et al.*, 2007). É, pois, importante definir situações de referência para que estas alterações possam ser quantificadas no futuro.

Vários autores têm vindo a alertar para o impacto que as alterações climáticas podem vir a ter nos recursos naturais das zonas costeiras. Países que não dispõem de séries de observação temporais e espaciais longas não terão capacidade de entender, prever e avaliar o impacto destas alterações nestes ecossistemas (Fernandino *et al.*, 2018). Nos últimos anos registaram-se algumas alterações no clima de Portugal, nomeadamente ao nível da precipitação, através de situações de seca extrema ou de inundações (Carvalho *et al.*, 2014), cujo impacto

sobre os estuários, como sistemas importantes e produtivos, importa conhecer.

O rio e estuário do Arade situa-se na costa sul de Portugal (Fig. 1). É considerado o segundo rio e estuário mais importante do Algarve (bacia de drenagem de 966 km<sup>2</sup>; SNIRH, 2013) e pouco se sabe quanto ao impacto do fluxo de água na qualidade da água no baixo estuário, a dinâmica deste ecossistema bem como a sua sensibilidade à intervenção humana e à variabilidade climática.



Fig. 1. Localização das secções de amostragem e área de amostragem no estuário do rio Arade, a azul no verão e a preto no inverno.

O estuário do Arade é considerado polihalino e com regime meso-mareal (Ferreira *et al.*, 2005), a maré sentida no estuário é do tipo semi-diurna (Ferreira, 2006). Há intrusão de água salgada até ca.15 km para montante da foz (Gomes *et al.*, 2014; Laut *et al.*, 2014).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o a influência de condições de seca sobre a qualidade da água no baixo estuário do Arade, em situação de verão (setembro de 2015), quando o país se encontrava em situação de seca severa (31,5% do território continental, IPMA, 2015) e num inverno quente e seco (janeiro de 2018), numa situação de seca severa, (55,6% do território continental, IPMA, 2018).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Local de amostragem e campanhas

De forma a atingir o objetivo deste trabalho foram realizadas 2 campanhas, uma de verão e outra de inverno numa secção do baixo estuário (Fig. 1), que tiveram uma duração de um ciclo de maré completo (~ 13 h). A campanha de verão foi realizada durante um ciclo de maré viva, durante as principais horas do ciclo (enchente, preia-mar, vazante e baixa-mar). No inverno foi durante um ciclo de maré intermédia.

Na área de estudo, as amostras foram recolhidas à superfície (~20 cm de profundidade), onde a influência de água doce se fará sentir de forma mais acentuada, e também no fundo.

### 2.2. Métodos

Foram medidos *in situ* a temperatura, a salinidade, o pH e o oxigénio dissolvido (em concentração e percentagem de saturação), com uma sonda multiparamétrica YSI 6820, calibrada antes de cada campanha com soluções padrão. Foram recolhidas amostras de água (1 L) para a análise de nutrientes (amónia, nitratos + nitritos, fosfatos e silicatos), clorofila *a* e sólidos em suspensão. As amostras para nutrientes foram filtradas através de um filtro Gelman de 0,45 µm, previamente descontaminado e pesado, que serviu para determinação de sólidos em suspensão (SS). Depois de filtradas, as amostras foram congeladas a -20° C até ao momento da sua análise. Os filtros para SS foram pesados depois de secos durante 1 hora a 100 ± 5° C e arrefecidos em exsiccador. Para determinação da concentração de clorofila *a* foram recolhidas amostras (2 L) que foram filtradas em filtros de fibra de vidro GF/F (0,7 µm de porosidade) e congelados a -20°C até ao momento da sua análise. Para a determinação de nutrientes e clorofila *a* foram aplicados os métodos espectrofotométricos descritos por Grasshoff *et al.* (1983) e Lorenzen (1967), respetivamente. Para a determinação de SS usou-se o método gravimétrico descrito por A.P. H. A. *et al.* (1992).

### 2.3. Tratamento estatístico

Como os dados não têm uma distribuição normal, foram aplicados testes não paramétricos para determinar se havia diferenças entre a superfície e o fundo, e entre os três locais amostrados ao longo da secção. O nível mínimo de confiança considerado foi de 95%.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como não se registaram diferenças verticais significativas ( $p > 0,05$ ) para os parâmetros analisados, ao longo da secção do canal do baixo estuário estudado, nos gráficos das campanhas de verão (Fig. 2) e de inverno (Fig. 3) representa-se a média dos valores a superfície e o fundo.

Ao longo da secção do canal, também não se registaram diferenças significativas segundo a horizontal ( $p > 0,05$ ) ao longo do período de amostragem em ambas as campanhas. No entanto, foi observado um aumento dos nutrientes na margem de Portimão (oeste), a margem onde se localiza a ETAR da Companheira, que, entretanto, sofreu remodelação, mas que tinha capacidade máxima de tratamento de *ca.* de 130000 habitantes equivalentes.

Em ambas as campanhas (Fig. 2 e 3) a salinidade variou num intervalo semelhante (31- 35.5) e em fase com a altura da maré, apesar de ser ligeiramente mais baixa na campanha de inverno. Para os nutrientes foi notório um padrão de variação em antifase com altura da maré. Isto é, os valores foram mais elevados durante o período de vazante até à baixa-mar devido à de maior contribuição do rio e mais baixos durante o período de enchente até à preia-mar por influência da água do mar mais pobre em nutrientes (efeito de diluição).

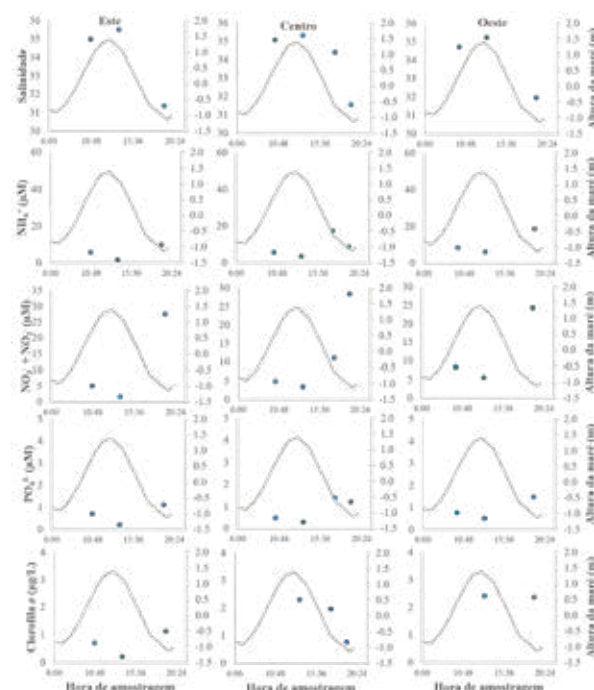


Fig. 2. Variação de salinidade, amónia ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\mu\text{M}$ ), Nitratos e nitritos ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\mu\text{M}$ ) e clorofila *a* ( $\mu\text{g/L}$ ) ao longo da secção reta do estuário do Arade durante um ciclo de maré completo na campanha de verão (setembro 2015).

Relativamente à qualidade da água, a sua variação depende fortemente da proporção da mistura da água do rio com a água do mar e, como tal, depende fundamentalmente da salinidade, a qual foi relativamente semelhante em ambas as campanhas.

Assim, a diferença de qualidade da água no baixo estuário do Arade no verão 2015 e o inverno de 2018 dever-se-á a outros fatores não explicados somente pela variabilidade da salinidade neste local. Globalmente, os dados recolhidos em ambos os ciclos de maré ao longo da secção do baixo estuário mostram concentrações mais baixas na situação de verão de 2015 do que na de inverno de 2018.

Na campanha de verão 2015 (Fig. 2), a amónia variou entre 2 e ca. 18  $\mu\text{M}$  enquanto os nitratos + nitritos entre ca. 2 e 30  $\mu\text{M}$ . Os fosfatos foram sempre  $< 1,5 \mu\text{M}$ . A clorofila *a* variou entre 0,8 e 3  $\mu\text{g/L}$ .

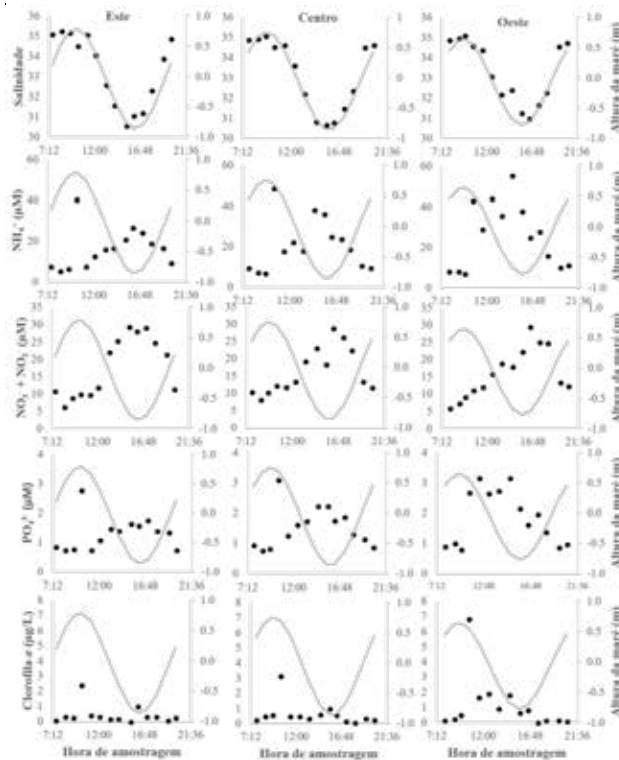


Fig. 3. Variação de salinidade, amónia ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\mu\text{M}$ ), Nitratos e nitritos ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\mu\text{M}$ ) e clorofila *a* ( $\mu\text{g/L}$ ) ao longo da secção reta do estuário do Arade durante um ciclo de maré completo na campanha de inverno (janeiro 2018).

Durante a campanha de inverno de 2018 (Fig. 3), a amónia variou globalmente entre 5 e ca. 55  $\mu\text{M}$ . Em preia-mar, na margem este e centro do canal, foi observado um aumento muito acentuado, possivelmente devido a uma descarga da ETAR da Mexilhoeira da Carregação, já que esta se situa na margem este do estuário ou doutra descarga pontual nesta zona do canal, e que coincidiu com alteração na cor da água durante este período de amostragem, nestes 2 locais. Na margem oeste, do lado da ETAR da Companheira, os valores foram globalmente mais elevados. Os nitratos + nitritos variaram entre ca. 6 e 30  $\mu\text{M}$ . Os fosfatos atingiram valores (máximo ca. 3  $\mu\text{M}$ ) mais elevados do que no verão de 2015. Tal como para a amónia, na margem este e centro próximo da preia-mar, observou-se um aumento pontual possivelmente explicado pelas razões

referidas anteriormente. A clorofila *a* nesta campanha foi mais baixa do que no verão de 2015, variando globalmente entre não detetável e 2  $\mu\text{g/L}$ , exceto o valor pontual de 7  $\mu\text{g/L}$  registado no período de preia mar na margem oeste.

Para se tentar perceber os fatores que influenciam a variabilidade dos nutrientes em ambas as campanhas foram ainda analisadas as imagens de satélite semanais de temperatura superficial do oceano (Fig. 4a e b) e de clorofila *a* (Fig. 4c e d) que englobaram os dois períodos de amostragem.

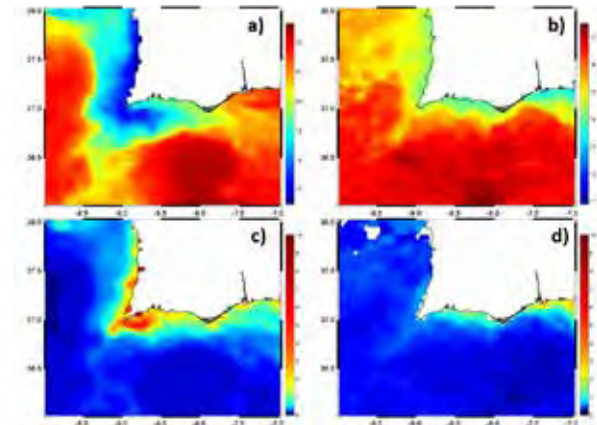


Fig. 4. Imagens de satélite semanais de temperatura superficial (em cima) e clorofila *a*, na área delimitada pelas coordenadas 36°-38° N, 7°-10°W, num período que abrangeu as campanhas realizadas a) e c) final do verão (22-29 de setembro de 2015) e b) e d) inverno seco (09-16 de janeiro de 2018).

As imagens de clorofila *a* mostram que no verão de 2015 as concentrações de clorofila *a* em frente a Portimão foram ca. 2  $\mu\text{g/L}$  superiores aos valores da campanha de inverno, tal como confirmado pelos valores medidos na secção. A temperatura superficial da água na costa sul do Algarve, no período em que a campanha foi realizada no final do verão (Fig. 4 a) foi relativamente baixa,  $\sim 18^\circ\text{C}$ , bastante mais baixa que na zona ao largo, onde se atingiram temperaturas próximas de  $22^\circ\text{C}$ . Este gradiente de temperatura entre a zona da costa e o largo evidencia a ocorrência de afloramento costeiro nesta região, o qual não foi observado em janeiro de 2018 (Fig. 4b). Este processo oceanográfico pode ter promovido o desenvolvimento de fitoplâncton, que pode ser responsável pelo consumo mais acentuado de nutrientes no estuário num período seco de verão, e refletido num aumento de clorofila *a* no baixo estuário.

Quanto à pressão resultante da flutuação da população servida pela ETAR, sabe-se que no verão ocorre um aumento populacional na zona de Portimão e que se reflete num aumento de caudal descarregado na ETAR da Companheira ( $\sim 27000 \text{ m}^3/\text{dia}$ ) relativamente a inverno seco ( $\sim 20000 \text{ m}^3/\text{dia}$ ; comunicação pessoal Águas do Algarve), mas que face ao consumo de nutrientes pelo fitoplâncton, esta pressão não foi mais evidente em setembro de 2015. Em janeiro de 2018, num

período extremamente seco, sem precipitação significativa, o aumento dos nutrientes relativamente à campanha de verão seco de 2015, pode dever-se a um menor consumo por parte do fitoplâncton conjuntamente com a contribuição de alguma descarga a partir das ETAR (Mexilhoeira da Carregação e/ou da Companheira) ou descarga pontual efetuada numa zona que afete a secção estudada, particularmente importante quando outras fontes externas associadas a drenagem e escoamento terrestre estão diminuídas.

#### 4. CONCLUSÃO

- Os dados recolhidos durante ambos os ciclos de maré completos (~ 13 h) na secção do baixo estuário mostram concentrações mais elevadas de nutrientes no inverno seco de 2018 do que no verão de 2015.

- Ao longo da secção, a margem oeste (de Portimão) é a que sofre maiores alterações de qualidade de água. Tal facto pode estar associado à maior influência da descarga da ETAR da Companheira perto do local estudado.

- Estes períodos de seca extrema podem ser importantes para se perceber a influência de eventos extremos num potencial contexto de alterações climáticas. No entanto, estes dados também mostram que para caudais fluviais baixos, as alterações na qualidade da água estão bastante dependentes dos processos biológicos, principalmente do crescimento fitoplanctónico que consome nutrientes para se desenvolver.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Wildwatch Algarve, em particular ao André Dias e à APSines – Administração dos Portos de Sines e do Algarve, particularmente à Eng<sup>a</sup> Filipa Duarte, pelo apoio logístico disponibilizado e a toda a equipa que participou nestas campanhas.

#### REFERÊNCIAS

- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. Maryland, USA.
- Carvalho, A., Schmidt, L., Santos, F.D., Delicado, A., 2014. Climate change research and policy in Portugal. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5, 199–217.
- Fernandino, G., Elliff, C.I., Silva, I.R., 2018. Ecosystem-based management of coastal zones in face of climate change impacts: Challenges and inequalities. *Journal of Environmental Management* 215, 32–39.
- Ferreira, A., 2006. *Impacte do Plano do Porto de Portimão na Hidrodinâmica do Estuário do Arade*.
- Ferreira, J.G., Bettencourt, A., Bricker, S.B., Marques, J.C., Meirinho, A., Newton, A., Nobre, A., Salas, F., Silva, M.C., Simas, T., Soares, C. V., Stacey, P., Vale, C., Wolff, W.J., 2005. MONAE - Water Framework Directive – Transitional and Coastal Waters Proposal for the definition of water bodies.
- Gleick, P.H., 2003. Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century, *in*: State of the Planet.
- Gomes, A., Boski, T., Moura, D., Szkornik, K., Witkowski, A., Connor, S., Jacob, J., Gabriel, S., Horta, J., Camacho, S., 2014. Sedimentological and physico-chemical characterization of intertidal zones in the Arade Estuary (Southern Portugal), *in*: 3<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica.
- Grasshoff, K., Erkhart, M., Kremling, K., 1983. *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie, New York.
- IPMA, 2018. Boletim Climatológico - Janeiro 2018. URL <http://www.ipma.pt/resources> (accessed 4.10.18).
- IPMA, 2015. Boletim Climatológico Mensal - Setembro de 2015. URL <http://www.ipma.pt/resources> (accessed 4.10.18).
- Kennedy, V.S., Twilley, R.R., Kleypas, J.A., Jr, J.H.C., Hare, S.R., 2002. *Coastal and marine ecosystems*, Pew Center. ed. VA.
- Laut, L.L.M., Cabral, I.A., Rodrigues, M.A.C., Silva, F.S., Martins, M. V.A., Boski, T., Gomes, A.I., Dias, J.M.A., Fontana, L.F., Laut, V.M., Mendonça-Filho, J.G., 2014. Compartimentos Ambientais do Estuário do Rio Arade, Sul de Portugal, com Base na Distribuição e Ecologia de Foraminíferos. *Anuario do Instituto de Geociencias* 60–74.
- Lorenzen, C., 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* 12, 343–346.
- Marques, S.C., Azeiteiro, U.M., Martinho, F., Pardal, M.Â., 2007. Climate variability and planktonic communities: The effect of an extreme event (severe drought) in a southern European estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 725–734.
- Mirza, M.M.Q., 2003. Climate change and extreme weather events: can developing countries adapt? *Climate Policy* 3, 233–248.
- SNIRH, 2013. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (1995-2013).

# Otimização da incerteza da amostragem do Rio Tejo para a deteção de episódios de poluição

C. Borges (1), R. B. da Silva (2), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho. Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa; [carlos.borges@hidrografico.pt](mailto:carlos.borges@hidrografico.pt)

(2) Centro de Química Estrutural - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C8, Campo Grande, 1749-016 Lisboa

**Resumo:** A avaliação da eficácia das políticas de gestão da qualidade ambiental numa massa de água baseia-se na monitorização dos seus níveis de poluição. A caracterização ou avaliação da variação da poluição de um rio é afetada pela representatividade da amostra recolhida e pela incerteza da medição da concentração de poluentes na amostra. A representatividade da amostra pode ser melhorada através do aumento do volume e número de subamostras combinadas numa amostra composta. Assim, a incerteza do conhecimento dos níveis de poluição do rio é função da qualidade da amostra e da caracterização da amostra, estimadas pela incerteza da amostragem e pela incerteza da análise da amostra, respetivamente.

Este trabalho apresenta uma metodologia de otimização da caracterização de contaminantes no Rio Tejo – aplicada ao caso particular da concentração de nitratos – com vista a permitir a deteção, com incerteza conhecida, de variações da poluição do rio que antecipem problemas ambientais relevantes e a estimar a incerteza associada à amostragem pontual.

**Palavras-chave:** Monitorização ambiental, Amostragem, Otimização, Incerteza, Rio Tejo.

## 1. INTRODUÇÃO

A monitorização numa massa de água é utilizada para avaliar a eficácia de políticas relevantes de proteção ambiental, como, p.e., o cumprimento dos valores máximos definidos para os teores de poluentes presentes na descarga de águas residuais para as mesmas massas de água (valores limite de emissão, VLE), ou normas de qualidade ambiental no domínio da política da água. A avaliação da qualidade ambiental de uma massa de água requer, pois, a capacidade de comparar a concentração dos componentes químicos (poluentes ou outros) nela presentes em diferentes ocasiões. Acresce ainda que, devido à heterogeneidade natural destes sistemas, a caracterização ou avaliação da qualidade das águas é afetada pela representatividade da amostra recolhida e pela incerteza da medição da concentração na amostra dos componentes químicos em análise, pelo que é essencial ter-se também conhecimento da dispersão de resultados que está associada à amostragem pontual, de modo a incorporar este conhecimento numa análise mais vasta da variabilidade do sistema.

Assim, para um determinado ponto de colheita e a uma profundidade específica, a comparação da concentração de componentes químicos depende das variações sazonais e geográficas/espaciais da composição da água, da representatividade da amostra e da incerteza da medição de poluentes na amostra. No caso particular da amostragem ser efetuada a tempos distintos mas em condições similares (coordenadas de GPS, profundidade, condições sazonais e meteorológicas equivalentes), a

comparação da concentração de componentes é afetada apenas pela incerteza da amostragem e pela caracterização de amostras de água do rio. Se uma variação mínima de um composto específico precisa ser detetada, frequentemente, a amostragem e a caracterização da amostra devem ser otimizadas para garantir que a sua incerteza seja suficientemente pequena para o uso pretendido da monitorização.

Este trabalho apresenta o caso particular da otimização da incerteza de amostragem com base na dispersão de resultados obtidos, aumentando o número de subamostras colhidas para análise e caracterização da composição química da água do rio, num local específico, aplicada à determinação do teor em nitratos no estuário do rio Tejo em condições de inverno e em situação de baixa-mar.

Depois de desenvolver modelos da variação da incerteza de amostragem com parâmetros de amostragem relevantes e definir estratégias para reduzir a incerteza da análise da amostra, é possível otimizar a incerteza da estimativa da composição da água de um rio para, por um lado, distinguir variações no sistema maiores que um valor mínimo e, assim, identificar episódios de poluição e, por outro, estimar a incerteza associada à amostragem pontual.

## 2. PRINCÍPIOS TEÓRICOS

A distribuição dos componentes químicos presentes na água de um sistema estuarino é função de um conjunto bastante vasto de influências, mas que podem, grosso modo, ser agrupadas em três vetores principais: o sistema de águas doces proveniente de montante, o de águas salinas proveniente de jusante e as fontes antropogénicas da área. Localmente, esta



distribuição vai depender, para uma determinada profundidade, das dimensões do próprio sistema, da sua morfologia, do seu caudal, do ciclo de maré e da sazonalidade. É ainda necessário considerar a influência da ação antropogénica na heterogeneidade do sistema pois, se o principal foco de poluição for o fluxo de um efluente, ele pode contribuir mais para a heterogeneidade do sistema do que a que advém de emissões atmosféricas.

Dadas as dificuldades na identificação de todas as fontes que contribuem para a heterogeneidade da composição local do sistema, a amostragem pontual para efeitos de monitorização da qualidade ambiental, apesar de ser, reconhecidamente, uma ferramenta útil para este efeito, pode, por exemplo, identificar como normais situações episódicas anómalas.

Um modo de ultrapassar esta limitação é proceder à colheita e análise de amostras replicadas, em que se pode assumir que os valores obtidos para os diversos componentes em análise se ajustam a uma função de distribuição de probabilidade normal. Assumindo que se tem uma distribuição específica de valores, pode-se então usar o modelo de distribuição definido para caracterizar a heterogeneidade do sistema e, subsequentemente, otimizar o processo de amostragem, isto é, reduzir a incerteza associada à amostragem e assim, fazer refletir esta incerteza no resultado final. O modelo a desenvolver terá ainda de contemplar algumas restrições, de modo a eliminar a possibilidade de estimar valores aberrantes.

Como a otimização da amostragem inclui a definição do número, volume e distribuição da localização de subamostras, é necessário modelar a variação espacial da composição da água do rio. Para viabilizar essa modelagem, é necessário definir formas pragmáticas de inferir sobre a heterogeneidade do sistema a partir da amostragem realizada usando um volume de amostra específico e a distribuição dos pontos de amostragem.

A estimativa por excesso da heterogeneidade do sistema pode ser usada para reduzir a possibilidade da incerteza de amostragem sobrestimar a representatividade da amostra (i.e., supor que a amostra é mais representativa do que de facto é). O modelo da variação espacial da composição da água do rio será mais preciso se forem reunidos mais dados sobre a heterogeneidade do sistema.

Neste trabalho, a modelação da heterogeneidade do sistema estudado é baseada na análise de dez amostras em coordenadas GPS conhecidas e a incerteza da amostragem estimada pela simulação da variabilidade da amostragem deste sistema com um ou mais pontos de amostragem.

### 3. MODELAÇÃO DA INCERTEZA DE AMOSTRAGEM

A modelação da incerteza da amostragem implica a distinção das características das diversas avaliações analíticas, ou seja, da incerteza do procedimento de ensaio utilizado, da heterogeneidade da composição

do sistema estudado e do desenvolvimento de modelos de variação espacial da composição do sistema. Esta secção está dividida nas seguintes subsecções:

1. Procedimento experimental;
2. Quantificação da repetibilidade das medições;
3. Quantificação da heterogeneidade da composição da água do rio numa área do mesmo;
4. Modelação da variação espacial da composição;
5. Avaliação da incerteza de amostragem.

#### 3.1. Procedimento Experimental

A caracterização da heterogeneidade da composição da água do rio envolve a colheita de dez amostras de 4-5 L de água do rio, amostradas a uma profundidade de 1 m, num círculo com diâmetro não inferior a dez vezes a resolução do equipamento de GPS usado para registar a posição dos pontos de amostragem. O volume de amostra colhido é homogeneizado para recolha de uma fração de 100 mL para análise. Considerando o número de replicados efetuados, assume-se que os resultados apresentam uma distribuição normal, pois a seleção de um modelo de distribuição diferente deste exigiria a recolha de um grande número de dados (amostras).

A amostragem foi realizada em estófo de baixa-mar, em situação de maré morta, por corresponder a uma situação em que a composição da água é mais estável. As amostras foram colhidas aleatoriamente dentro do círculo de amostragem e codificadas como S1 a S10. As amostras foram analisadas dentro de um período de tempo em que o componente estudado é estável, em condições de repetibilidade (ou seja, no mesmo dia, mas não necessariamente no dia da colheita da amostra), tendo as amostras sido preservadas entre a colheita e a análise por congelação a temperatura inferior a -20 °C.

#### 3.2. Quantificação da repetibilidade das medições

Como a dispersão observada dos resultados da análise das subamostras deriva da combinação da repetibilidade da análise das amostras e da variabilidade da composição da água do rio, é necessário estimar a repetibilidade da medição.

A repetibilidade da medição foi estimada a partir da análise em duplicado de subamostras em medições realizadas ao longo de mais de dois anos no laboratório. Em alternativa, esta componente da precisão pode também ser estimada realizando a análise em replicado das amostras colhidas no círculo de amostragem e extraído a repetibilidade da medição a partir de uma análise de variâncias.

Devido à variação da precisão da medição ao longo da gama de trabalho, os resultados da análise duplicada das amostras foram divididos em dois intervalos de concentração: o Intervalo I, entre o Limite de Quantificação,  $\gamma_{LQ}$  e duas vezes o  $\gamma_{LQ}$  (ou seja,  $[\gamma_{LQ}; 2\gamma_{LQ}]$ ), onde se considera que a dispersão de resultados é constante em termos absolutos e o

Intervalo II, acima de  $2\gamma_{LQ}$ , em que se considera que a dispersão relativa dos resultados é constante.



Fig. 1. Localização dos pontos de amostragem; a escala apresentada no centro do detalhe corresponde a uma distância de 50 metros.

Esta modelação do desvio padrão da repetibilidade das medições,  $s_r$ , resulta do facto de que o desvio padrão da repetibilidade das medições,  $s_{r(I)}$ , ser constante abaixo de  $2\gamma_{LQ}$ , e o desvio padrão relativo da repetibilidade da medição,  $s'_{r(II)}$ , ser aproximadamente constante acima de  $2\gamma_{LQ}$ .

Quando, como no caso presente, o laboratório dispuser de um grande conjunto de dados de resultados duplicados antes da avaliação da incerteza de amostragem, é mais conveniente usar esses dados para estimar a precisão da medição do que para realizar análises duplicadas das amostras colhidas no círculo de amostragem.

Para o Intervalo I,  $s_{r(I)}$  é estimado como a média da amplitude de duplicados dividida por 1,128 (ISO 5725-6). Para o Intervalo II,  $s'_{r(II)}$  é estimado como a média da amplitude relativa de duplicados dividida por 1,128 (ISO 5725-6).

### 3.3. Quantificação da heterogeneidade da composição da água

Assumindo que a concentração do componente avaliado numa área definida do rio, estudada através de colheitas aleatórias no círculo de amostragem, tem uma distribuição normal, a dispersão das concentrações estimadas é quantificada pelo desvio padrão,  $s_S$ . Portanto, o desvio padrão que quantifica a variabilidade da concentração do componente estudado na água do rio,  $s_V$ , é estimado pela seguinte equação:

$$s_V = \sqrt{s_S^2 - s_r^2} \quad (1)$$

Se as amostras analisadas tiverem uma concentração posicionada no Intervalo II,  $s_r$  é estimado multiplicando  $s'_{r(II)}$  pela média dos resultados da amostra. Os graus de liberdade de  $s_S$  e  $s_r$  condicionam a confiabilidade de  $s_V$ . A distribuição de  $s_V$  foi estimada por Simulações de Monte Carlo de  $s_S$  e  $s_r$  considerando os graus de liberdade dos desvios padrão.

### 3.4. Determinação da variação espacial da composição

Assumindo que a concentração do componente em estudo na água do rio, a uma profundidade específica na área de amostragem, tem uma distribuição normal bivariada, função da incerteza das coordenadas GPS à qual se combina a incerteza da medição da amostra, é possível prever o impacto destas variáveis na caracterização de um ponto de amostragem. A combinação da informação sobre vários pontos de amostragem permite uma modelação da composição da água do rio na totalidade do círculo de amostragem. Esta informação permite modelar o desempenho de diferentes planos de amostragem.

Os parâmetros relevantes da amostragem são o número de subamostras e a área amostrada.

Esta modelação pode ser facilmente realizada usando Simulações de Monte Carlo dos resultados da variabilidade espacial da composição do rio e da amostragem subsequente deste modelo.

### 3.5. Modelação da incerteza de amostragem

Considerando que a amostragem é função de três variáveis distintas, duas referentes à posição no espaço (plano  $x, y$ ) e uma terceira referente à concentração do componente em estudo na água ( $z$ ), a modelação da composição da água do rio dentro de um triângulo tridimensional de três pontos é definida por um plano delimitado por três vetores que unem os três pontos. O vetor que une os pontos  $(x_1, y_1, z_1)$  e  $(x_2, y_2, z_2)$  é assim definido no espaço cartesiano  $\mathbb{R}^3$  como descrito na Equação (2).

$$\vec{r} = \langle x_1, y_1, z_1 \rangle + t \langle x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1 \rangle \quad (2)$$

em que  $\langle x_1, y_1, z_1 \rangle$  é a origem do vetor e  $t \langle x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1 \rangle$  é a distância cartesiana entre os dois pontos.

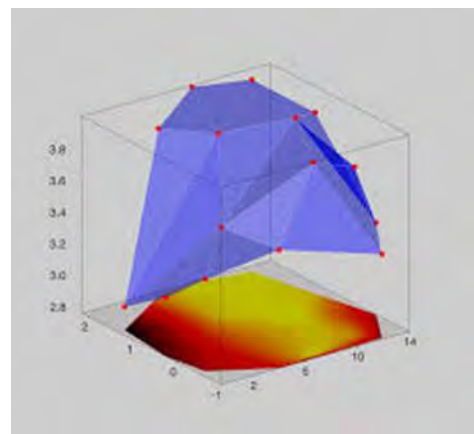


Fig. 2. Exemplo de representação no espaço cartesiano das superfícies de concentração definidas por conjuntos de três pontos de amostragem; no plano encontra-se representada a concentração estimada com base nos dados reais.

Acresce ainda que a modelação deve ser considerada válida apenas no espaço do círculo de amostragem, pelo que são definidos constrangimentos à extensão de  $t$ , de modo a que o vetor definido seja limitado ao

espaço definido pelos três pontos de amostragem mais próximos. Com estas condicionantes estabelecidas, é definida uma grelha no espaço cartesiano (cf. exemplo da Figura 2) que é sujeita a simulações das suas variáveis que determinam a incerteza do modelo e das previsões baseadas no mesmo.

Com base nestas premissas, e considerando que a origem do vetor não se situa em (0,0,0), para um determinado ponto do plano (x, y) é modelado o valor de z, isto é, a concentração esperada para aquele ponto.

#### 4. RESULTADOS

A repetibilidade associada à determinação analítica foi estimada com base na análise em duplicado de 40 amostras, estimando-se em 1,02 % a incerteza padrão relativa de repetibilidade ( $s'_r$ ) e em 1,21 % a incerteza padrão relativa de precisão intermédia ( $s'_{PI}$ ) (Borges, 2018). Também a incerteza expandida relativa ( $k = 2$ ) associada à determinação analítica foi estimada em 5,77 % (Borges, s.d.).

Da análise das 10 amostras, e considerando a incerteza associada à determinação analítica resultaram os dados constantes da Tabela I. O posicionamento dos pontos de amostragem foi determinado relativamente a um ponto selecionado previamente (com as coordenadas geográficas 38,818239° N; 009,050556°W, referidas ao *datum* WGS84), que se definiu como a origem do plano espacial, isto é  $(x, y) = (0,0)$ . Para se simular a incerteza associada à precisão do GPS, que é de 3 m, assumiu-se que a mesma se aplicava igualmente aos dois eixos do plano.

Para modelar a heterogeneidade da composição da água e a incerteza desta modelação, foram realizadas simulações numéricas de Monte Carlo (Silva *et al.*, s.d.) que, com base nos dados da Tabela I, geram 10 000 previsões aleatórias eliminando as que não respeitam as condicionantes acima definidas. De modo a determinar a variabilidade do modelo de amostragem, foram realizadas aleatorizações independentes das variáveis estudadas, tendo-se obtido os valores constantes da tabela II.

Tabela I. Posicionamento, concentração e incertezas associadas às amostras analisadas.

Ponto de amostragem, S;	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x (m)	-179	-101	-97	21	69	130	-20	-118	-107	-88
y (m)	-6	-123	-181	-121	-97	-27	-102	-48	-18	-12
$U(x) = U(y) (k = 2)$	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
z, [NO <sub>3</sub> ] (µmol L <sup>-1</sup> )	52,0	60,6	51,4	49,4	52,7	54,3	53,0	49,7	58,1	50,6
$U(z) (k = 2)$	3,0	3,5	3,0	2,9	3,0	3,1	3,1	2,9	3,4	2,9

Tabela II. Resultados das gerações independentes das simulações.

Simulação;	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teor determinado (µmol L <sup>-1</sup> )	53,09	52,84	53,01	52,93	53,00	52,80	52,25	53,26	53,06	52,62
Desvio Padrão (µmol L <sup>-1</sup> )	6,43	7,16	6,69	6,39	6,52	7,01	6,92	6,68	6,60	6,52
Desvio Padrão relativo (%)	12,11	13,50	12,63	12,08	12,30	13,27	13,24	12,55	12,44	12,39
Máximo [P97,5] (µmol L <sup>-1</sup> )	39,34	36,54	38,22	37,96	37,96	35,05	37,04	37,69	36,98	37,69
Mínimo [P02,5] (µmol L <sup>-1</sup> )	66,34	66,92	66,28	65,59	65,14	65,81	65,50	67,30	66,29	64,70
n	613	633	617	605	637	613	575	675	665	664

#### 5. DISCUSSÃO

Os dados constantes da Tabela II apresentam uma grande homogeneidade, com o teor determinado a variar entre 52,25 µmol L<sup>-1</sup> e 53,25 µmol L<sup>-1</sup>, e o desvio padrão associado à modelação de dados a variar entre 12,08 % (simulação 4) e 13,50 % (simulação 2).

Como tomada de decisão para apresentação de estimativa de incerteza associada à heterogeneidade da composição da água para o teor em nitratos, no ponto de amostragem selecionado, definiu-se que se selecionaria a situação mais desfavorável, que é, no presente caso, um desvio padrão relativo  $s'_s$ , de 13,50 %.

Com base na equação (1), e conhecendo também o valor de  $s'_r$  (1,02 %), pode-se estimar a variabilidade da concentração de nitratos,  $s'_v$ :

$$s'_v = \sqrt{13,50^2 - 1,02^2} = 13,46\%$$

Verifica-se assim que a amostragem é a componente de incerteza mais relevante para o resultado final.

#### Agradecimentos

Bolsa PostDoc da Fundação para a Ciência e a Tecnologia SFRH/BPD/110186/2015.

#### REFERÊNCIAS

- ISO 5725-6:1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 6: Use in practice of accuracy values, Genève, ISO, 1994.
- Borges (2018). Revalidação do método de determinação do nitrato+nitrito (REL TF QP04/18), Instituto Hidrográfico, 27 pp.

## Pollutants of recent concern in coastal areas – methods and levels

N. Ratola (1), F. Rocha (1), D. Capela (1), V. Homem (1), P. Jiménez-Guerrero (2), J. Castro-Jiménez (3), A. Alves (1)

- (1) LEPABE, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.
- (2) Physics of the Earth, Regional Campus of International Excellence “Campus Mare Nostrum”, University of Murcia, Department of Chemistry, Campus de Espinardo, 30100 Murcia, Spain.
- (3) MIO, Aix Marseille University, UM 110, Marseille, France

**Abstract:** This work intends to shed light on the presence and behaviour of some organic chemicals of concern of emerging concern, namely their levels in several matrices common in coastal areas and the analytical protocols used to face the challenging extraction of target compounds from these natural matrices. With a focus on volatile methylsiloxanes (VMSs), their levels and trends found in air, sand and marine vegetation in the course of several works conducted at LEPABE and in collaboration with foreign institutions are reported and discussed. In general, a strong seasonal trend (higher values in the summer) is seen in the atmosphere of beaches impacted by tourism in the atmosphere. This trend is also seen in sand in a lesser extent and marine vegetation tend to represent a background incidence instead of a marked seasonal profile. Further attention and research is needed to ensure the sustainability of these delicate and valuable environments.

**Keywords:** siloxanes, coastal areas, air, sand, seaweed

### 1. INTRODUCTION

The sustainability of coastal areas is of extreme importance, particularly in countries where the summer months attract numerous tourists to the local beaches. This afflux of extra population can produce a significant impact in terms of the emission and exposure to a myriad of contaminants. Some of them have been receiving close attention lately, namely those incorporated in the formulations of personal care products (PCPs), profusely used in the holiday seasons. Markedly cyclic as to the population inflow, coastal zones allow a thorough assessment of the temporal trends of the presence of contaminants like siloxanes, synthetic musks or UV filters since the use of sunscreens, deodorants, perfumes and other related products is among the most obvious sources of contamination of these chemicals.

Focusing on volatile methyl siloxanes (VMSs), these can be either linear or cyclic and consist of a structural unit of alternating Si-O bond with organic side chains (Pedrouzo *et al.*, 2011). They have been widely used not only in PCPs and cosmetics and but also in industrial applications such as lubricants, paints, biomedical products and as antifoaming agents (Rücker and Kümmerer, 2015). Having high vapour pressure, volatilization to the atmosphere is the dominant mode of emission. They are also persistent (high half-life) and very lipophilic (high Kow), hence prone to long-range transport and bioaccumulation (Warner *et al.*, 2010). Recent reports suggest that siloxanes can cause toxic effects in aquatic organisms and estrogen mimicry, connective tissue disorders, adverse immunologic

effects and fatal liver and lung damage in exposed animals (Dudzina *et al.*, 2014). Their presence was proven in different environmental media such as biota, wastewater and surface water, air, sediments, sludge, soil and vegetation (Rücker and Kümmerer, 2015; Ratola *et al.*, 2016). Wastewater treatment plants (WWTPs) are other preferential endpoints of VMSs. About 10% of VMSs from PCPs enter the domestic sewage system, most of VMSs will settle down in the WWTPs' sludge line, with a small fraction (1-2%) remaining in the water and being released to natural aqueous systems (Xu *et al.*, 2013).

In this work, the levels and trends of linear (L2, L3, L4, L5) and cyclic (D3, D4, D5, D6) VMSs are reported for air, sand and marine vegetation samples from different coastal areas of Portugal (and some in other countries), representing the current knowledge in the region.

### 2. MATERIALS AND METHODS

When matrices of different kind are involved, it is unlikely that a single analytical protocol is enough to quantify the target analytes in all samples. In fact, in this case passive air samples followed a more classical method (Soxhlet extraction), whereas sand and marine vegetation used QuEChERS as a solvent-saving extraction technology, with slight changes in the protocol.

Passive air samplers were put into a 200 mL Soxhlet extractor and extracted overnight with DCM/Hex 1:1. Then, the extract was passed through a glass column containing  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , reduced to approximately 1 mL, evaporated to near-dryness by  $\text{N}_2$  and redissolved in 150  $\mu\text{L}$  of Hex. For marine vegetation and sand, the QuEChERS technology used was based in a protocol for soils and pine needles developed by Ratola et al (2016). For marine vegetation, 2.5 g were extracted for 15 min in an ultrasonic bath with 10 mL of Hex. The first QuEChERS (Q1) containing 6 g of anhydrous  $\text{MgSO}_4$  and 1.5 g of  $\text{CH}_3\text{COONa}$  was added and vortexed for 3 min before being separated by centrifugation for 10 min. The extract was transferred to the second QuEChERS (Q2) consisting of 900 mg of  $\text{MgSO}_4$ , 300 mg of PSA-bonded silica and 150 mg of C18 and again vortexed and centrifuged. After solvent reduction, the extract was redissolved in 150  $\mu\text{L}$  of n-hexane. For sand, 5 g of sample were sonicated with 5 mL of DCM/Hex 1:1, QuEChERS (Q1) contained 2,4 g of anhydrous  $\text{MgSO}_4$  and QuEChERS (Q2) had 180 mg of  $\text{MgSO}_4$ , 60 mg of PSA-bonded silica and 300 mg of C18.

Instrumental analysis of VMSs for all matrices was performed using a Varian Ion Trap GC-MS system (Walnut Creek, CA, USA), equipped with a 4000-GC gas chromatograph, a 240-MS ion trap mass spectrometer, a CP-1177 split/splitless injector adapted with a Merlin microseal system (a microvalve alternative to the conventional silicone rubber septa) and an auto-sampler model CP-8410. To prevent bleeding from common chromatographic columns and minimize background contaminations of siloxanes, compound separation was obtained in a low-bleed Agilent DB-5ms ultra-inert column (30 m  $\times$  0.25 mm I.D., 0.25  $\mu\text{m}$  film thickness) at a constant flow of helium (1.0 mL.min<sup>-1</sup>). The temperature programme was the following: 35 °C hold for 5 min, raised at 10 °C.min<sup>-1</sup> to 95 °C, then 5 °C.min<sup>-1</sup> to 140 °C and finally 35 °C.min<sup>-1</sup> to 300 °C (hold for 5.43 min), in a total time of analysis of 30 min. Injection (1  $\mu\text{L}$ ) was in split mode, with the split ratio of 100, with a liner without glass wool. Temperatures of manifold, ion trap, transfer line and injector were maintained at 50, 200, 250 and 200 °C, respectively. The mass spectrometer was operated in the electron ionization (EI) mode (70 eV) and for quantitative analysis of target compounds, time-scheduled selected ion storage (SIS) mode was applied. The filament emission current was 50  $\mu\text{A}$ .

Linearity responses were good, ranging from 1 to 750  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  for each siloxane studied, with  $R^2$  values higher than 0.996 and low limits of detection and quantification, on  $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$  levels, suitable for the detection of these contaminants at trace levels. Very good global mean recoveries was obtained, as well as intraday and interday precision values common in

similar studies (RSD values lower than 10 and 15%, respectively, for most of the target compounds).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The results presented are summarized in terms of total VMSs concentration ranges and by matrix (Table I).

Table I. Total VMSs concentration ranges in air, sand and marine vegetation in coastal areas.

Season	Air ( $\text{ng m}^{-3}$ )		Sand ( $\text{ng g}^{-1}$ )		MV ( $\text{ng g}^{-1}$ )	
	W	S	W	S	W	S
Linear	n.d. to 0.05	n.d. to 0.18	n.d. to 0.62	n.d. to 14.7	n.d. to 0.58	n.d. to 2.33
Cyclic	n.d. to 2.39	n.d. to 5.90	0.61 to 10.9	1.14 to 40.5	n.d. to 26.8	n.d. to 290

W- Winter; S - Summer; MV - Marine vegetation; n.d. - not detected

Results show that for air, there is a considerably higher presence of VMSs in the summer, which is somewhat contrary to findings in other studies, like in the north of Europe, where the lower concentrations of OH radicals in the atmosphere in the winter explained the higher levels in the colder months (McLachlan *et al.*, 2010). In these countries, summer rush to the beaches is not relevant, so the input of the sudden overload of tourist using VMS-containing products in their formulations is not considered. And this can be the fact that accounts for the higher concentrations in the summer in Portugal. Sand also shows a similar seasonal trend, but not as high in absolute values. This is a matrix of low organic content, so accumulation of VMSs may not occur to a large extent, but rather reflect the daily input of beach-goers. In the case of marine vegetation, the exposure is indirect, mostly via the sea water. VMSs are not strongly soluble, so it is expected that the seasonal differences are not as marked, rather revealing background levels throughout the year.

In all matrices the presence of the cyclic VMSs was much higher than for the linear ones. In particular, D5 and D6 showed consistently the highest levels, reflecting the usage pattern in consumer products, where both have a predominance over the other congeners.

### 4. CONCLUSIONS

The results and trends obtained confirm that the monitoring of coastal areas is crucial to fill in the still considerable gaps on the behaviour of VMSs and other emerging pollutants.

## Acknowledgements

This work was the result of the project: (i) POCI-01-0145-FEDER-006939 (LEPABE – UID/EQU/00511/2013) funded by the European Regional Development Fund (ERDF), through COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and by national funds, through FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; (ii) NORTE-01-0145-FEDER-000005-LEPABE-2-ECO-INNOVATION, supported by North Portugal Regional Operational Programme (NORTE 2020), under the Portugal 2020 Partnership Agreement, through the ERDF; (iii) Investigador FCT contract IF/01101/2014 (Nuno Ratola); (iv) Post-Doctoral grant SFRH/BPD/76974/2011 (Vera Homem). Additional financial support was given by Project ECoMarE (ANR-11-LABX-0061), funded by Labex OT-Med, French Government “Investissements d’Avenir” (ANR) (France).

## REFERENCES

- Brink, H., and Allen, J. (1978). On the Effect of Bottom Friction on Barotropic Motion Over the Continental Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 8, 919-922.
- Dudzina, T., Goetz, N., Bogdal, C., Biesterbos, J., and Hungerbuhler, K. (2014). Concentrations of cyclic volatile methylsiloxanes in European cosmetics and personal care products: prerequisite for human and environmental exposure assessment. *Environment International*, 62, 86-94.
- McLachlan, M.S., Kierkegaard, A., Hansen, K.M., van Egmond, R., Christensen, J.H., and Skøth, C.A. (2010). Concentrations and fate of decamethylcyclopentasiloxane (D5) in the atmosphere, *Environmental Science & Technology*, 44, 5365-5370.
- Pedrouzo, M., Borrull, F., Marcé, R.M., and Pocurull, E. (2011). Analytical methods for personal-care products in environmental waters. *Trends in Analytical Chemistry*, 30, 749-760.
- Ratola, N., Ramos, S., Homem, V., Silva, J.A., Jiménez-Guerrero, P., Amigo, J.M., Santos, L., and Alves, A. (2016). Using air, soil and vegetation to assess the environmental behaviour of siloxanes, *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 3273-3284.
- Rücker, C., and Kümmerer, K. (2015). Environmental chemistry of organosiloxanes, *Chemical Reviews*, 115, 466-524.
- Xu, L., Shi, Y., and Cai, Y. (2013). Occurrence and fate of volatile siloxanes in a municipal wastewater treatment plant of Beijing, China, *Water Research*, 47, 715-724.

# Validação da determinação de compostos organoclorados em solos e sedimentos por cromatografia de fase gasosa com detetor de captura de eletrões

P. Santos (1), A.C. Rocha (1), C. Palma e R. Silva (2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa; paula.santos@hidrografico.pt.

(2) Centro de Química Estrutural – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C8, Campo Grande, 1749-016 Lisboa.

**Resumo:** A acreditação do ensaio de determinação de organoclorados em solos e sedimentos por extração acelerada com solvente (ASE), e purificação em coluna de Florisil®, de acordo com a Norma NP EN/ISO 17025:2005 (IPQ, 2005), exigiu a validação da metodologia analítica. Neste âmbito foram estimados e avaliados os seguintes parâmetros de desempenho: gama de trabalho, linearidade da resposta instrumental, limiares analíticos (limite de deteção e limite de quantificação), precisão (associada a condições de repetibilidade e de precisão intermédia), veracidade e incerteza. O estudo contemplou os compostos: hexaclorobenzeno (HCB) e os 7 bifenilos policlorados considerados congêneres indicadores (PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB 153 e PCB180). Obteve-se assim a acreditação flexível global tipo B, para os parâmetros acima referidos constantes no Anexo III da Portaria nº1450/2007 que define os parâmetros a analisar para definição do grau de contaminação de materiais a dragar.

**Palavras-chave:** Validação, Acreditação, Poluentes Orgânicos.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sedimentos marinhos podem conter elevadas cargas de poluentes orgânicos, pois estas substâncias, devido ao seu caráter hidrofóbico e baixa solubilidade em água, aí tendem a acumular-se. Dentro destes compostos, o Hexaclorobenzeno (HCB) e os Bifenilos Policlorados (PCBs) tomam particular relevância, devido a sua persistência e toxicidade, estando desde 2001 incluídos na lista de poluentes da Convenção de Estocolmo (Stockholm Convention), sendo considerados Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs).

Estas substâncias devido às suas características, estão contempladas em legislação nacional no Anexo III da Portaria nº1450/2007, de 12 de novembro, que estabelece os parâmetros a analisar para definição de classes de contaminação dos materiais dragados.

Este trabalho teve por objetivo apresentar a validação efetuada à metodologia analítica de determinação do HCB e de 7 Bifenilos Policlorados, considerados congêneres indicadores (PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB 153 e PCB180), em amostras de solos e de sedimentos, para submeter a acreditação pelo Instituto Português da Acreditação (IPAC) de acordo com a norma NP EN/ISO 17025:2005 (IPQ, 2005).

## 2. PROCEDIMENTO ANALÍTICO

A metodologia analítica de determinação destes compostos baseia-se na extração das amostras, previamente liofilizadas e moídas, pela técnica de

Extração Acelerada por Solvente (ASE), utilizando uma mistura de solventes orgânicos. O extrato assim obtido é purificado por cromatografia de adsorção líquido-sólido em coluna de vidro. O adsorvente utilizado como fase estacionária é o Florisil® e a fase móvel é o n-Hexano. O teor em PCBs e HCB é determinado num cromatógrafo gasoso com a coluna capilar CPSiL8CB (50 m × 0,25 mm × 0,12 µm) acoplado a um Detetor de Captura Eletrónica.

A confirmação da identidade dos compostos assim como dos valores quantitativos é efetuada numa coluna com diferente polaridade, a CPSiL19CB (50 m × 0,25 mm × 0,20 µm).

## 3. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Validar um método interno de ensaio é demonstrar que o mesmo é suficientemente robusto para reproduzir resultados com qualidade adequada ao objetivo da determinação, sendo este um dos requisitos da norma NP EN/ISO 17025:2005 (Requisitos Gerais de Competência para Laboratórios de Ensaio e Calibração) para acreditação de ensaios. A validação do procedimento de ensaio envolve a determinação e avaliação dos seguintes parâmetros de desempenho da medição: limiares analíticos (Limite de deteção, LD, e quantificação, LQ); linearidade da resposta instrumental; gama de trabalho; precisão (associada a condições de repetibilidade e de precisão intermédia); veracidade e incerteza. Eurachem Guide (2014).

### 3.1. Limite de Detecção (LD) e Quantificação (LQ) Instrumental e do Método.

O LD é considerado como o teor mínimo a partir do qual é possível efetuar a deteção do analito e o LQ o teor mínimo do analito que é possível quantificar com precisão e exatidão adequadas (Guia Relacre nº13, 2000). Os LD e LQ instrumentais foram determinados com base no sinal instrumental de uma solução padrão de concentração vestigial (0,6 ng mL<sup>-1</sup>) para os PCBs e (0,2 ng mL<sup>-1</sup>) para o HCB, em condições de precisão intermédia. Estes parâmetros foram determinados através das seguintes expressões:

$$LD = 3s \qquad LQ = 10s$$

sendo  $s$  o desvio padrão de réplicas ( $n = 20$ ) do padrão vestigial.

Tabela I. LD e LQ. Instrumental e do Método para o HCB e para os 7PCBs.

Composto	$\bar{x}$ (ng mL <sup>-1</sup> )	S	Instrumental		Método	
			LD	LQ	LD	LQ
HCB	0,261	0,031	0,092	0,3	0,006	0,020
PCB 28	0,707	0,077	0,232	0,8	0,015	0,052
PCB 52	0,713	0,101	0,304	1,0	0,020	0,068
PCB 101	0,694	0,056	0,169	0,6	0,011	0,038
PCB 118	0,695	0,079	0,238	0,8	0,016	0,053
PCB 153	0,706	0,063	0,190	0,6	0,013	0,042
PCB 138	0,693	0,090	0,271	0,9	0,018	0,060
PCB 180	0,697	0,103	0,310	1,0	0,021	0,069

### 3.2. Gama de trabalho e Linearidade

A gama de trabalho considerada teve por base o historial das amostras efetuadas. A gama de trabalho instrumental e do método (considerando uma toma de 15 g de amostra) para os PCBs é de 1 ng mL<sup>-1</sup> a 12 ng mL<sup>-1</sup> e 0,07 a 0,80 µg kg<sup>-1</sup>, respetivamente. Para o HCB, a gama de trabalho instrumental e do método é de 0,24 ng mL<sup>-1</sup> a 4,80 ng mL<sup>-1</sup> e 0,02 µg kg<sup>-1</sup> a 0,32 µg kg<sup>-1</sup>, respetivamente.

A linearidade da resposta do detetor µECD para cada um dos congéneres e HCB foi determinada graficamente pela altura de pico (sinal instrumental) versus massa de padrão injetada e avaliada, de forma pragmática, pelo coeficiente de correlação de *Pearson*. Na Fig.1 estão representadas as curvas de calibração para os analitos em estudo com um coeficiente de correlação de *Pearson* superior a 0,995 para todos os compostos, evidenciando que, para a gama de trabalho do método, o sinal varia linearmente com a concentração de analito.

### 3.3. Precisão (Repetibilidade e Intermédia)

A precisão da medição reflete a variabilidade ou dispersão de resultados de uma série de ensaios quantificáveis por um desvio padrão ( $s$ ). Quando os resultados são obtidos em idênticas condições de ensaio e no mesmo dia, tem-se a precisão em condições de repetibilidade. Quando as medições são realizadas em dias diferentes tem-se a precisão intermédia.

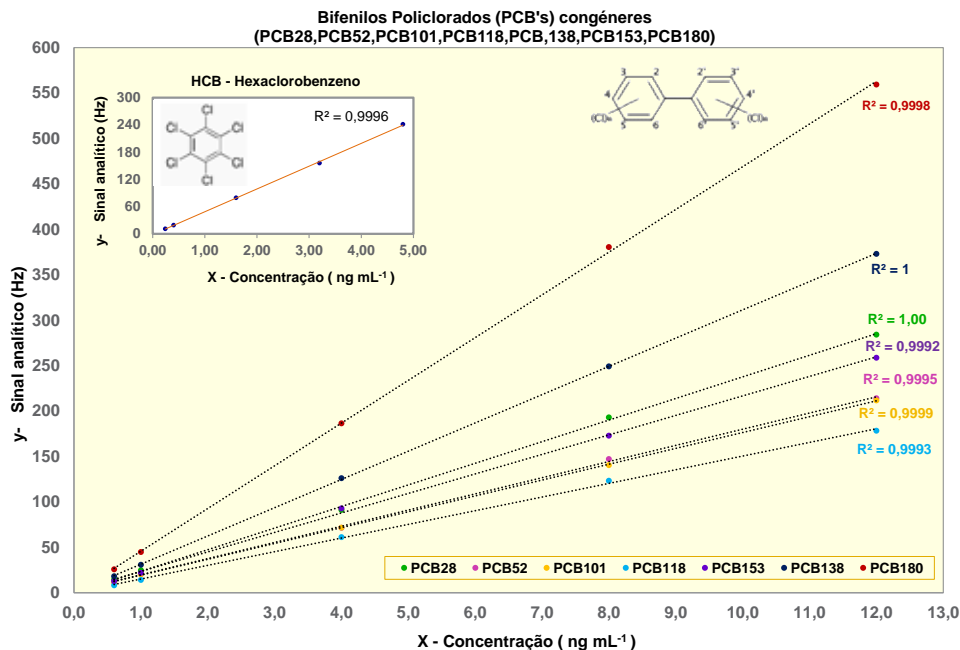


Fig.1. Representação gráfica da linearidade do sinal do GC-µECD para os congéneres de PCB's em estudo e HCB.

Os valores de LD e LQ do método foram determinados considerando uma toma de 15 g de amostra e 1 mL de volume final de aferição do extrato orgânico. Os resultados obtidos constam na Tabela I. Ficando majorado o LQ para todos os PCBs em 0,07 µg kg<sup>-1</sup>.

A precisão em condições de repetibilidade ( $s_r$ ) foi estimada através do desvio padrão de replicados de amostras e a precisão intermédia ( $s_{PI}$ ) através do desvio padrão de ensaios de recuperação efetuados em matriz inerte. A recuperação média do método  $\bar{R}$  e a precisão  $s_r$  e  $s_{PI}$  constam na Tabela II.



Tabela II. Desvios padrão de precisão Intermédia ( $s_{PI}$ ) e repetibilidade ( $s_r$ ) das medições.

Composto	N	$\bar{R}$ (%)	$S_r$ (%)	$S_{PI}$ (%)
HCB	20	102,1%	8,8%	12,0%
PCB 28	20	97,5%	4,4%	10,7%
PCB 52	20	90,0%	10,4%	9,0%
PCB 101	20	94,9%	9,1%	9,4%
PCB 118	20	103,0%	9,0%	9,7%
PCB 153	20	108,8%	9,2%	8,0%
PCB 138	20	109,2%	8,8%	10,0%
PCB 180	20	104,8%	8,9%	9,7%

### 3.4. Veracidade

A concordância entre um resultado estimado e o valor de referência aceite como verdadeiro condiciona a veracidade da medição. A avaliação da veracidade foi efetuada através dos resultados obtidos nos ensaios de testes de aptidão QUASIMEME (*Quality Assurance of Information for Marine Environmental Monitoring in Europe-QUASIMEME*).

De acordo com o valor de Z-score o desempenho laboratorial pode ser:

Satisfatório se:  $|Z - score| \leq 2$

Questionável se:  $2 < |Z - score| \leq 3$

Insatisfatório se:  $|Z - score| > 3$

Na Fig.2 estão apresentados os resultados de Z-score nos testes de aptidão de 2011 a 2017.

Os desempenhos menos satisfatórios observados foram sempre avaliados e, as práticas seguidas foram melhoradas.

### 3.5. Estimativa da Incerteza da medição ( $U'$ )

Em termos práticos, a incerteza da medição indica o valor absoluto máximo do erro que pode afectar a medição com um nível de confiança definido. Eurachem Guide (2012).

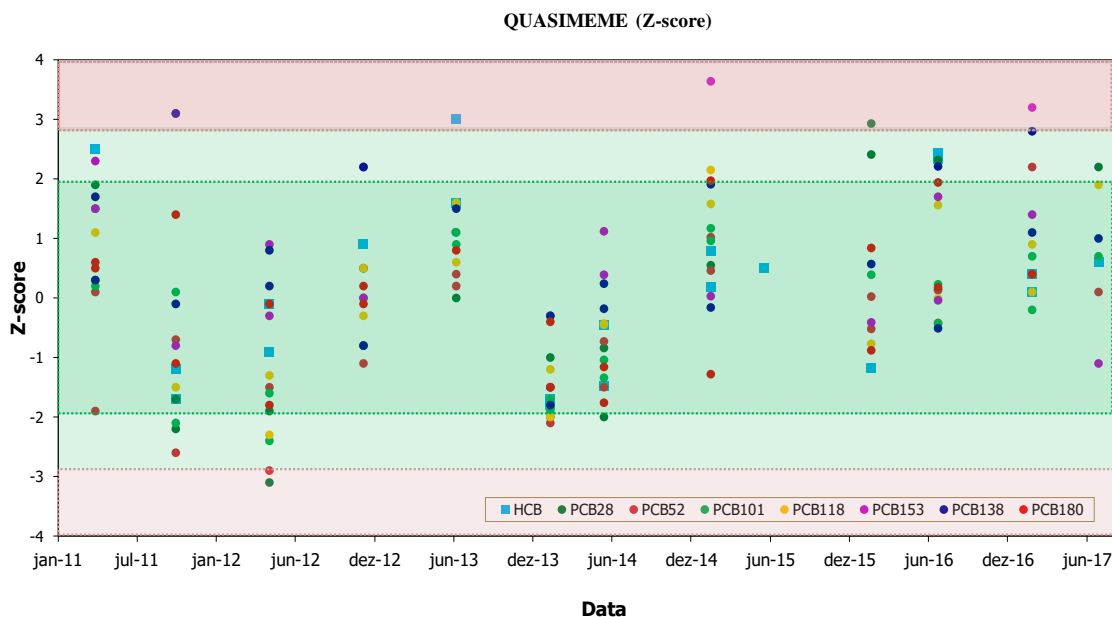


Fig.2. Representação gráfica dos valores de Z-score em testes de aptidão de 2011 a 2017.

O desempenho do laboratório é avaliado através do cálculo do parâmetro Z-score determinado através da seguinte expressão:

$$Z - score = \frac{(X_{Lab(i)} - X_{Ref})}{\sigma}$$

$X_{Lab(i)}$  — fração mássica estimada pelo laboratório  $i$ ;  
 $X_{Ref}$  — fração mássica de referência do ensaio interlaboratorial (EIL);  
 $\sigma$  — unidade de desvio definida pelo promotor do teste de aptidão.

A abordagem utilizada baseou-se na combinação de duas componentes de incerteza do resultado da medição: a componente de precisão e a componente de veracidade, ambas estimadas através dos parâmetros de desempenho global da medição reunidos durante a validação intralaboratorial do procedimento. Eurachem/Citac Guide, (2015), ISO 11352, (2012).

#### 3.5.1. Quantificação da incerteza padrão relativa associada à precisão ( $u'_{pre}$ )

Esta componente combina o desvio padrão relativo da repetibilidade,  $s'_r$ , observada na análise de amostras reais com o desvio padrão relativo da precisão intermédia,  $s'_{PI}$ , que considera precisão de

todas as etapas de medição exceto a que advém da heterogeneidade das amostras reais:

$$u'_{prec.} = \sqrt{S_{PI}^2 + S_r^2}$$

3.5.2. *Quantificação da incerteza padrão relativa associada à veracidade ( $u'_{ver.}$ ).*

A componente da veracidade foi estimada com base nos dados de  $n$  participações em testes de aptidão através da recuperação média da medição,  $\bar{R}$ , estimada de acordo com a equação:

$$\bar{R} = \frac{\sum X_{Lab(i)}}{n \sum X_{Ref(i)}}$$

Neste caso, a  $u'_{ver.}$  associada a  $\bar{R}$  é calculada pela equação:

$$u'_{ver} = \sqrt{\left(\frac{S_R^2}{n \times \bar{R}^2}\right) + \left(\frac{CV}{\sqrt{m}}\right)_{MAX}^2}$$

$S_R$  – desvio padrão da recuperação de analito;

$(CV/\sqrt{m})_{MAX}$  – maior valor da razão do desvio padrão relativo dos resultados dos participantes do teste de aptidão a dividir pela raiz quadrada do número de laboratórios que contribuíram para determinar a média consensual de referência do ensaio.

3.5.3 *Quantificação da incerteza padrão relativa combinada ( $u'_c$ ) e Expandida ( $U'$ )*

As componentes de incerteza mencionadas atrás podem ser combinadas da seguinte forma:

$$u'_c = \sqrt{u'_{prec.}^2 + u'_{ver.}^2}$$

A incerteza expandida ou da medição é calculada pela equação:

$$U = k \times u'_c \times x$$

$x$  – fração mássica da amostra;

$k$  – fator de cobertura ou expansão, que para um nível de confiança aproximadamente igual a 95% é igual a 2.

Tabela III. Incerteza do Método para o HCB e os 7PCBs.

Composto	$u'_{pre.}$ (%)	$u'_{ver.}$ (%)	$u'_c$ (%)	$U'$
HCB	14,9%	12,1%	19,3%	38,7%
PCB 28	11,6%	9,8%	15,0%	30,0%
PCB 52	13,8%	8,1%	15,6%	31,2%
PCB 101	13,1%	6,9%	14,6%	29,3%
PCB 118	13,2%	7,9%	15,5%	31,0%
PCB 153	12,2%	7,8%	14,9%	29,7%
PCB 138	13,3%	9,6%	16,9%	33,8%
PCB 180	13,1%	9,7%	16,6%	33,1%

Na Tabela III estão discriminadas as incertezas padrão relativas calculadas assim como a incerteza expandida relativa para cada um dos parâmetros em estudo.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de submeter a acreditação dos parâmetros referidos no Anexo III da Portaria nº1450/2007, HCB, PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB 153 e PCB180, foi necessário validar a metodologia de análise destes compostos em solos e em sedimentos de modo a dar resposta aos requisitos da Norma NP EN/ISO 17025:2005 (IPQ, 2005).

Os parâmetros relevantes do desempenho da medição foram determinados e os resultados apresentados neste trabalho. O método demonstrou ser suficientemente robusto para reproduzir resultados adequados ao objetivo em vista. Obteve-se assim a acreditação flexível global tipo B, pelo Instituto Português da Acreditação (IPAC) em março de 2018.

#### REFERÊNCIAS

- Eurachem/Citac Guide (2012). Quantifying uncertainty in analytical measurement, 3rd Edition, EURACHEM.
- Eurachem Guide (2014). The Fitness for Purpose of Analytical Methods 2nd Edition.
- Eurachem/Citac Guide, (2015). Setting and using target uncertainty in chemical measurement, 1st Edition, EURACHEM.
- Guia Relacre nº13 (2000), Validação de Métodos Internos de Ensaio em Análise Química. Membros da Comissão Técnica Relacre\_CTR03 RELACRE.
- ISO 11352 (2012). Water quality – Estimation of measurement uncertainty based on validation and quality control data. International Organization for Standardization.
- NP EN ISO/IEC 17025 (2005). Requisitos Gerais de Competência para Laboratórios de Ensaio e Calibração. Instituto Português da Qualidade. Caparica.
- Portaria nº 1450/2007. D.R. I Série, 217 (07-11-12) 8372-8382.
- Stockholm Convention. The 12 initial POPs under the Stockholm Convention, consultado em <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/The12InitialPOPs/tabid/296/Default.aspx>.

# One Year Monitoring of Water Characteristics Inside Ria Formosa

J. Jacob (1), A. Cravo (1), A. Rosa (1), M. Rodrigues (2) and J. Rogeiro (2)

(1) Universidade do Algarve, CIMA, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, jjacob@ualg.pt.

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

**Abstract:** Estuaries and coastal lagoons are among the most productive ecosystems on Earth and provide multiple ecosystem services. However, the predicted increase of human activities, together with climate change, may increase the hazards in these systems and change their dynamics. The goal of the project UBEST is to improve the global understanding of the biogeochemical buffering capacity of Ria Formosa and Tagus River and their susceptibility to future scenarios of anthropogenic inputs and climate change. For that “observatories” will be deployed which are emerging tools that integrate process-based numerical models and *in-situ* observations. In this work we analyse the variability of water characteristics (temperature, salinity, pH, dissolved oxygen, turbidity and chlorophyll *a*) acquired over almost one year, every 15 min on a real-time monitoring station installed in the Port of Faro. The high frequency of data acquisition enables the understanding of both seasonal variability and occurrence of short-term events inside Ria Formosa.

**Key words:** Coastal lagoon, Ria Formosa, coastal ecosystem, physical-chemical properties of water

## 1. INTRODUCTION

Ria Formosa is a coastal lagoon located in the south coast of Portugal (Fig.1), delimited by 5 islands, 2 peninsulas and 6 inlets. These inlets are interconnected by a complex network of channels, allowing the permanent water exchange with the ocean and the water recirculation within the lagoon. Considering the hydrodynamics, this system can be divided in three different sectors: eastern, central and western sectors (Salles *et al.*, 2005).

An online water quality monitoring station was installed in the Ria Formosa by the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) and the Universidade do Algarve under the scope of the project UBEST - Understanding the biogeochemical buffering capacity of estuaries relative to climate change and anthropogenic inputs (PTDC/AAG-MAA/6899/2014). This project aims at improving the global understanding of the biogeochemical buffering capacity of estuaries and its susceptibility to future scenarios of anthropogenic inputs and climate change, to effectively support the short and long-term management of these systems. UBEST scientific goals will be achieved by the deployment of “observatories” in two Portuguese case studies: the Tagus estuary and the Ria Formosa coastal lagoon.

The online water quality monitoring station is one of the components of the Ria Formosa observatory and was installed on May 2017 in the port of Faro (Fig.1). Data from the UBEST case study of Ria Formosa lagoon will be presented, considering the continuous real-time observation at this station along

almost one year (11 months), covering different seasonal conditions.



Fig. 1. The Ria Formosa coastal lagoon with the location of the real-time observatory (RTO).

## 2. DESCRIPTION OF THE MONITORING STATION

### 2.1 Location

The water quality monitoring station is located in the Ria Formosa, in the Cais do Combustível of the Port of Faro (37° 00' 9.92" N, 7° 55' 16.28" W; Figure 1), which is an old and disabled fuel dock under the administration of the APS - Ports of Sines and the Algarve Authority.

The Port of Faro is located in one of the main channels of the western sector of the Ria Formosa, the Faro channel. Since about 90% of the water volume is exchanged in the western sector of the lagoon (Pacheco *et al.*, 2010), this location was selected aiming to be representative of the water quality in one of the main channels of the Ria

Formosa. The selection of this site took also into consideration other criteria, namely access to essential infrastructures (e.g., GSM/GPRS connectivity), ability to obtain permission to install the equipment and protection from vandalism.

## 2.2 Description of the equipment and structures

The water quality online monitoring station is equipped with an YSI EXO 2 multiparameter probe (Fig. 2) which includes sensors to measure water temperature, conductivity/salinity, pH, dissolved oxygen, turbidity and chlorophyll *a*. The probe is also equipped with copper-alloy sensor guard and an anti-fouling wiper to reduce the biofouling in the sensors.

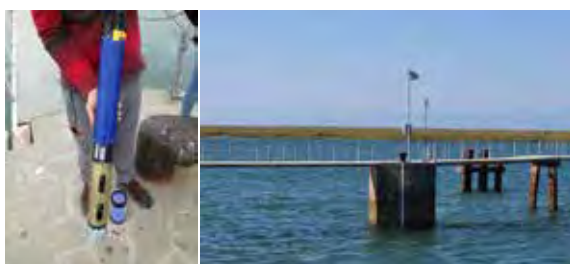


Fig. 2. YSI EXO 2 multiparameter probe and general overview of the Ria Formosa monitoring station.

Data acquisition and transmission is performed using an OBSERMET OMC-045-III data logger which includes a GSM/GPRS modem. Data is transferred through the internet, from the remote site to LNEC's premises, using the FTP protocol. The transmission procedure happens each hour, producing a new csv formatted file encompassing the data sampled/acquired in that period.

The probe is supported and protected by a PVC tube, while the data logger is protected by an environmental shelter. The power supply to the operation of the multiparameter probe and of the data logger is provided by solar panels.

The multiparameter probe is under operation since 26<sup>th</sup> May, 2017, while the online data transmission system is under operation since 29<sup>th</sup> June, 2017. Data are measured continuously at the monitoring station with 15 minutes' intervals. Measured data, transmitted hourly, is stored in a data repository developed for the UBEST project, and will be accessible in the web platform.

## 2.3 Description of the equipment and structures

Maintenance procedures were established and implemented to guarantee the continuous acquisition of the data, the safety of the multiparameter probe and the quality of the data. At the Ria Formosa station, these procedures are performed by the members of UAlg's team with the support of APS -

Port of Faro, which provides the access to the place where the probe is installed.

Two levels of maintenance procedures are considered:

- Periodic cleaning, verification and inspection – procedures of visual inspection and manual cleaning of the probe, verification and/or calibration of sensors. These procedures were performed with a periodicity of two weeks during the first two months of operation of the probes to ensure the quality of the acquired data. After this period these procedures were performed with the periodicity of one month. For safety reasons at least two technicians were required;
- Out-of-schedule inspection – supplementary procedures for inspecting the probe may be undertaken when needed (e.g., lack of communication from the probe, observation of out of the range measurements) but have not yet been needed.

During the first month of operation of the probe five maintenance visits were performed on June 2017, on the following days: 7, 13, 20, 23 and 29. During these visits, the visual inspection of the probes and supporting structures was performed. Measured conductivity, pH and turbidity were checked using several calibration solutions. Conductivity was calibrated against a standard solution (1-point) of 50000 S/cm, pH by 3 different standard solutions (3-point calibration: pH 4, 7, 10) and turbidity by 2 standard solutions (2-point calibration): distilled water (0 NTU) and 12.7 NTU. Dissolved oxygen was calibrated at 100% air saturation every visit (1-point calibration). Chlorophyll *a* was calibrated during the first day of deployment, at 1-point (0 µg/L) based on distilled water, while on the June 23 a 2-point calibration was performed using distilled water (0 µg/L) and the results of a laboratorial analysis of *in situ* water sample collection. The results of calibrations, as expected, suggest a good performance of the sensors.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

This real-time observational station is continuously measuring a series of variables, ranging from physical (temperature and salinity) to chemical (pH, dissolved oxygen and turbidity) and biological processes on a 24/7 basis. Regarding temperature (Fig. 3, top), the seasonal cycle is well marked. The highest values (>20 °C) are observed in Summer and the lowest values (around 10 °C) in Winter, with intermediate values observed in Spring and Autumn. Upwelling events have also been recorded at some periods in the Summer (e.g., in August and September 2017, as confirmed by the wind velocity records, not shown). These events were responsible for a decrease in water temperature, pH and

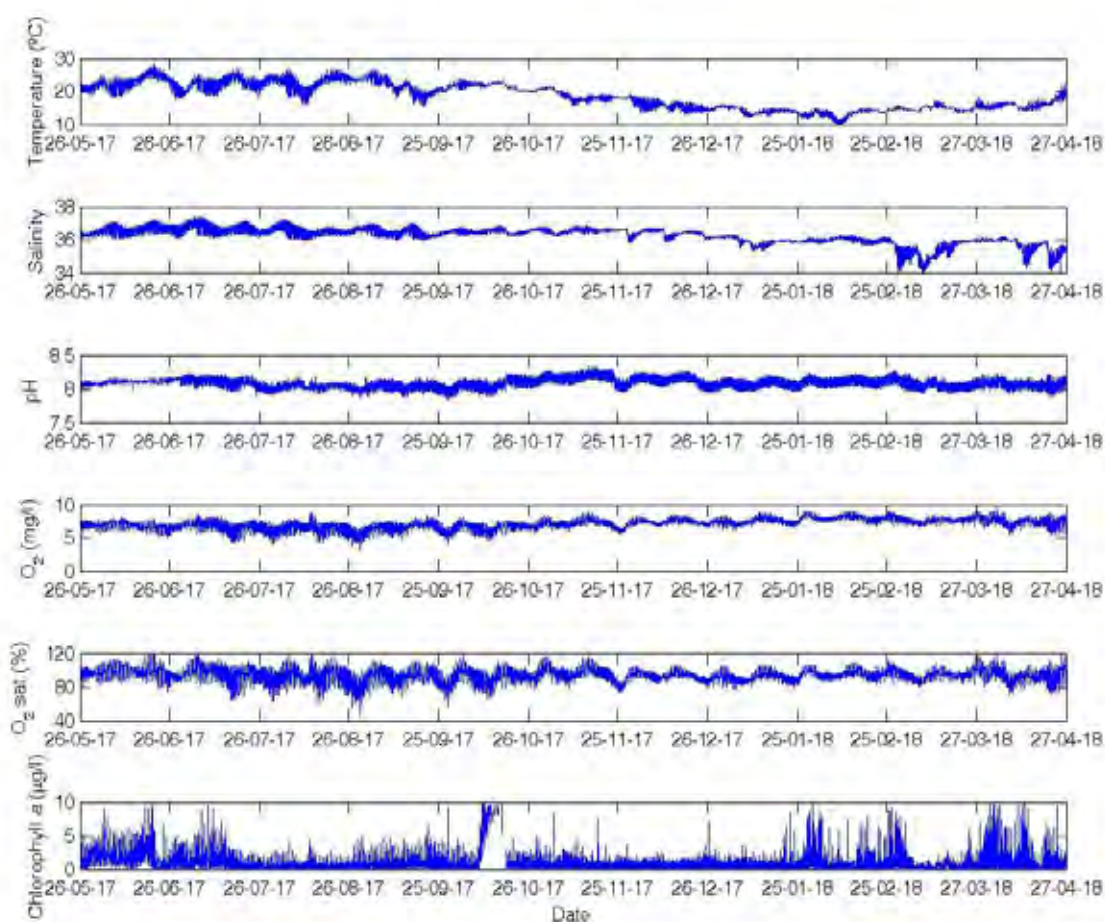


Fig. 3. Time series of data acquired with the YSI EXO 2 multiparameter probe along almost one year, from 26-5-2017 to 27-4-2018: temperature, salinity, pH, dissolved oxygen in concentration and in % of saturation and chlorophyll *a*.

dissolved oxygen, particularly during the night period when very low values of % of saturation of dissolved oxygen were attained, below the minimum allowable value (70%), corresponding to values < 5 mg/L. Salinity was also maximum in Summer (*ca.* 37) and minimum in Winter, less than 36 in January 2018 and within the range 34-35.5 in March-April 2018, after episodic rainfall and storm events. Regardless those extreme values, most of them were within the narrow range 36-36.5. The values of pH and dissolved oxygen depict a similar temporal variability, with higher values in Winter and lower values in Summer. The pH values varied within a small range, typical of coastal water (7.84-8.33). The range of dissolved oxygen was 3-10 mg/L, however most of the values were between 6 to 8 mg/L, which corresponds to well-oxygenated waters, globally within the range 80-110%.

The chlorophyll *a* and turbidity sensors are optical whose signal easily suffers interference and contamination from particles in the water and sometimes part of the values are not accurate and

can be considered as outliers, as in Fig 3, bottom, and Fig. 4, respectively for chlorophyll *a* and turbidity that must be discarded during Quality Control Analysis. Nevertheless, chlorophyll *a* globally was < 5 µg/L, with most values < 3 µg/L, despite maximum during the Spring-Summer period followed by Autumn. The high values > 5 µg/L recorded from January to March 2018, after rainfall events, could result from interference of suspended solids that could also emit fluorescence. For turbidity (Fig. 4), most of the data is < 15 NTU, majorly < 5 NTU typical of clear coastal waters. The rainfall and storm events of March-April 2018 were also captured in this parameter depicting values > 20 NTU.

Concerning the variability and influence of semi-diurnal tides, globally for the described parameters, it was more evident during spring tides than in neap tides.

In summary, using this innovative approach, this real time observational fixed station allows high-resolution temporal details and insights into different time variability scales, crossing from short to long term. It is possible to capture seasonal fingerprints along with semi-diurnal tidal, diurnal signals and ultimately episodic/extreme events that usually cannot be captured by using conventional sampling/monitoring strategies.

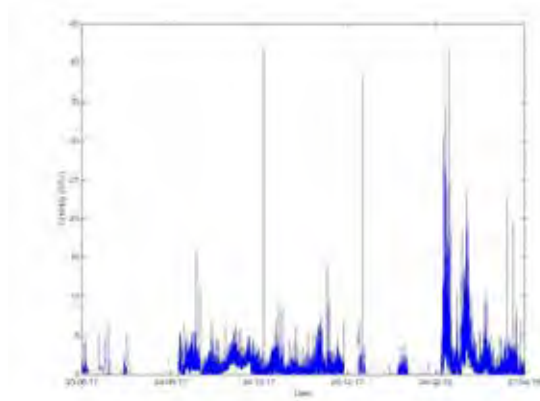


Fig. 4. Time series of turbidity data acquired with the YSI EXO 2 multiparameter probe along almost one year, from 23-6-2017 to 27-4-2018.

#### 4. CONCLUSIONS

The data presented provide observations to support the numerical model calibration and continuous validation used in the observatory implemented for the Ria Formosa study area.

An integrative approach was applied, linking data from continuous real time observations, discrete *in-situ* field campaigns and hydrodynamic-biogeochemical mechanistic models for the Ria Formosa. The project will further contribute to the development of a customizable and integrative WebSIG platform that will provide access to observations, real-time forecasts and future scenarios to stakeholders and other end-users.

The recorded high resolution data applied in a skill-assessed modelling system with targeted simulations of processes or scenarios offer multiple representations of processes, variability and change playing a key role to predict future scenarios of global changes.

These important observational data coupled with modelling can be translated into useful information for end-users and decision makers. This facilitates a better understanding of the functioning of this ecosystem and contributes to its short and long-term management and protection, imperative to building knowledge-based societies.

#### Acknowledgements

This work was funded by Fundação para a Ciência e a Tecnologia under the project UBEST – Understanding the biogeochemical buffering capacity of estuaries relative to climate change and anthropogenic inputs (PTDC/AAG-MAA/6899/2014).

The third author is funded by Fundação para a Ciência e a Tecnologia in the scope of the project UBEST (PTDC/AAG-MAA/6899/2014).

The fourth author is co-funded by Fundação para a Ciência e Tecnologia grant SFRH/BPD/87512/2012.

The authors would like to thank the APS - Ports of Sines and the Algarve Authority for the permission for the installation of the probe in the Port of Faro and all the support provided by their technicians during the installation and maintenances. The authors also thank the technicians of OilWater.

#### REFERENCES

- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J.J., Garel, E., Vila-Concejo, A., and Dias, J.A., (2010). Hydrodynamics and equilibrium of a multiple inlet system. *Marine. Geology*, 274, 32–42.
- Salles, P., Voulgaris, G., and Aubrey, D. (2005). Contribution of nonlinear mechanisms in the persistence of multiple tidal inlet systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 65, 475–491.

# Calibração de amostradores passivos monofásicos para a monitorização marinha de contaminantes orgânicos hidrofóbicos: uma revisão bibliográfica

A. Mendonça (1), A. C. Rocha (1), P. Santos (1) e C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa; ana.mendonca@hidrografico.pt.

**Resumo:** A amostragem passiva pode ser utilizada nos programas de monitorização conduzidos pelo Instituto Hidrográfico. Esta técnica tem a vantagem de ser económica, representativa e possuir maior sensibilidade relativamente à amostragem pontual. No entanto, para a sua aplicação é necessário conhecer, para cada contaminante, os valores dos coeficientes de partição entre os amostradores passivos e o meio aquático ( $K_{pw}$ ), bem como as respetivas taxas de amostragem específicas ( $R_s$ ). Tendo como base informação constante em referências bibliográficas, discutem-se os efeitos de diferentes fatores ambientais sobre os valores de  $R_s$  e  $K_{pw}$  e incertezas associadas.

**Palavras-chave:** Amostragem passiva, Contaminantes orgânicos hidrofóbicos, Coeficiente de partição, Taxa de amostragem específica.

## 1. INTRODUÇÃO

Através das suas ações de monitorização, o Instituto Hidrográfico (IH) pode contribuir com dados para avaliação do estado químico das massas de água no âmbito estratégia marinha europeia e de programas de monitorização internacionais (CE, 2008a; OSPAR, 2015). Para que seja possível uma análise comparativa das concentrações de contaminantes relativamente às normas de qualidade ambiental, esses dados deverão resultar de amostragens representativas (INCM, 2007; 2015; CE, 2008b; 2013).

No entanto, essas ações de monitorização baseiam-se em amostragens pontuais, tornando pouco exequível essa representatividade. Este problema pode ser ultrapassado através da utilização de amostradores passivos (AP) que permitem determinar concentrações médias para períodos de exposição de dias a anos, consoante o sistema em causa (Smedes e Booij, 2012; USEPA, 2012). Para além de permitir uma maior representatividade nos programas de monitorização, a técnica de amostragem passiva (TAP) possui ainda outras vantagens relativamente à amostragem pontual, tornando-a potencialmente útil para a monitorização da poluição resultante das atividades de dragagem e portuária (Lohmann *et al.*, 2012; Smedes e Booij, 2012; Miège *et al.*, 2015; Booij *et al.*, 2016).

Considerando as vantagens da TAP e que esta pode contribuir positivamente para o delineamento de futuros programas de monitorização, no âmbito da Diretiva Quadro da Água (DQA) e da Diretiva Quadro da Estratégia Marinha (DQEM), a sua utilização tem sido recomendada na Comissão Europeia como método complementar, passível de melhorar o nível de confiança nos dados de monitorização da água, comparativamente com a

amostragem pontual convencional (CE, 2009; 2013; Smedes e Booij, 2012).

Apesar destas recomendações, a TAP depara-se ainda com alguns constrangimentos relativamente à sua utilização em programas monitorização regulamentares. Estes estão relacionados com a exatidão nos valores de  $C_w$ , com o controlo e garantia de qualidade dos métodos (CQ/GQ) e com a sua harmonização (Miège *et al.*, 2015; Booij *et al.*, 2016; Vrana *et al.*, 2016).

Relativamente aos valores de  $C_w$ , os desvios à sua exatidão prendem-se com a variabilidade associada aos parâmetros de calibração dos AP para os diferentes contaminantes (Booij *et al.*, 2017). De fato, tanto os coeficientes de partição dos contaminantes entre os amostradores e o meio marinho ( $K_{pw}$ ), como as respetivas taxas de amostragem específicas ( $R_s$ ) são afetados por diversos fatores ambientais (e. g. pH, temperatura, salinidade, força iónica, matéria orgânica, agentes de degradação, turbulência e agitação marítima).

Através de uma pesquisa bibliográfica, esses efeitos serão investigados. Com este estudo, pretende-se contribuir para a implementação da TAP na amostragem de contaminantes orgânicos hidrofóbicos (COH) em programas de monitorização química, conduzidos pelo IH.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE TAP

A TAP baseia-se no fluxo livre das moléculas de um analito, entre o meio aquoso e a fase recetora, durante um período de exposição (Gorecki e Namiesnik, 2002; Vrana *et al.*, 2005). Desta forma, dá-se uma acumulação dos contaminantes ao longo desse período, traduzida por uma cinética de troca de 1ª ordem, para um compartimento (figura 1):

$$C_s(t) = C_w(K_1/K_2)(1 - e^{-k_2 t}) \quad [1]$$

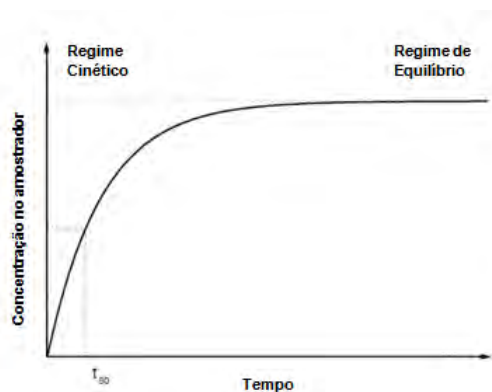


Fig. 1. Representação gráfica da concentração de um analito num amostrador passivo em função do tempo de exposição, segundo o modelo matemático de 1ª ordem, com os regimes cinético e de equilíbrio (Vrana et al., 2005).

Na equação [1]  $C_s(t)$  representa a concentração de um analito no amostrador durante o tempo  $t$ ,  $C_w$  é a concentração aquosa desse analito e os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  são constantes relativas aos fluxos água-amostrador e amostrador-água, respetivamente.

No início da exposição, está-se perante um regime cinético de transferência do analito para o amostrador e pode assumir-se que a taxa de massa transferida para a fase recetora é linearmente proporcional à diferença entre a atividade química do contaminante nas duas fases. Assim, a equação [1] pode tomar a forma:

$$M_s(t) = C_w R_s t \quad [2]$$

$M_s(t)$  representa a massa de um analito acumulado no amostrador após o tempo  $t$ ,  $R_s$  é a uma constante de proporcionalidade, normalmente designada como taxa de amostragem.  $R_s$  corresponde ao produto de  $k_1$  com o volume de água equivalente, por unidade de tempo  $t$ . Neste caso, sabendo o valor de  $R_s$ ,  $C_w$  pode ser determinada por regressão linear e corresponde à concentração média ao longo do tempo  $t$  (TWA). Os AP a operar neste regime designam-se como integrativos (Vrana et al., 2005).

O regime cinético da amostragem passiva pode durar dias, nos casos em que o coeficiente de partição octanol-água ( $K_{ow}$ ) é tal que  $\log K_{ow}=4$ , ou anos, nos casos em que  $\log K_{ow}=7$  (Smedes e Booij, 2012). Para além das características químicas do analito, a cinética de amostragem depende também do material e configuração do AP, do caudal de amostragem, bem como de fatores ambientais, tais como a temperatura e a salinidade da água (Smedes e Booij, 2012). Geralmente, a amostragem torna-se mais rápida com maiores caudais e a maiores temperaturas (Smedes e Booij, 2012). Desta forma, para a quantificação da cinética de amostragem recorre-se à utilização de compostos de referência de desempenho (PRC) para fortificar o AP, antes da sua exposição ao meio (Booij et al., 2002; Smedes e Booij, 2012).

Se  $t$  for suficientemente longo ou se a afinidade do analito para o amostrador for alta, atinge-se o

equilíbrio termodinâmico e a equação [1] passa a ter a forma:

$$C_s = C_w K_{pw} \quad [3]$$

$C_s$  representa a concentração de analito acumulado no amostrador e  $K_{pw}$  é o coeficiente de partição entre o amostrador e a água ( $K_{pw}=K_1/K_2$ ). Como  $C_s$  se mantém constante,  $C_w$  pode ser estimada a partir  $K_{pw}$ . Este parâmetro também depende dos fatores anteriormente descritos (Stuer-Lauridsen, 2005; Vrana et al., 2005; Smedes et al., 2009; Rusina et al., 2010; Smedes e Booij, 2012; Jonker et al., 2015; Booij et al, 2017).

Analisando as equações que traduzem cada regime, verifica-se que quando a amostragem é integrativa,  $C_w$  depende essencialmente da precisão de  $R_s$ . Por outro lado, quando a amostragem se encontra na fase de equilíbrio,  $K_{pw}$  tem grande influência na incerteza associado ao valor de  $C_w$  (Booij et al., 2017).

### 3. AMOSTRADORES PASSIVOS PARA CONTAMINANTES ORGÂNICOS HIDROFÓBICOS E SUA CALIBRAÇÃO

De entre os parâmetros químicos monitorizados pela Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho do IH (DTQP), incluem-se os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) e bifenilos policlorados (PCBs). Por serem persistentes e potencialmente perigosos, estes compostos constam na lista das substâncias prioritárias (INCM, 2007; 2015).

Para a monitorização de COH em meios aquáticos, existem diferentes AP disponíveis (Stuer-Lauridsen, 2005; Rusina et al., 2007; Miège et al., 2015; Booij et al., 2016). Destes, os monofásicos de polietileno de baixa densidade, LDPE e de polidimetilsiloxano, PDMS, ou borracha de silicone, SR, são considerados os mais simples, sob o ponto de vista prático (Müller et al., 2001; Vrana et al., 2005; Rusina et al., 2007; Smedes et al., 2009; 2010; Lohmann, 2012; Smedes e Booij, 2012; Reitsma et al, 2013; Miège et al., 2015). A calibração destes AP é feita através da fortificação com PRC para determinação da concentração final, após o período de exposição (Booij et al., 2002; Rusina et al., 2010; Booij e Smedes, 2010; Smedes e Booij, 2012). Com este método de calibração,  $R_s$  é estimado através da regressão não linear da equação que traduz a fração de cada PRC retida (F) em função do seu  $K_{pw}$  (Booij e Smedes, 2010, Booij et al., 2017):

$$F = e^{-R_s t / m K_{pw}} \quad [4]$$

Sendo  $m$  a massa do polímero utilizado como amostrador. Desta forma, embora a precisão no valor  $C_w$  de um contaminante alvo não dependa do seu  $K_{pw}$ , a precisão do valor de  $R_s$  depende das incertezas associadas ao valor estimado para o  $K_{pw}$  do respetivo composto de referência.

De acordo com Smedes e Booij (2012), para os polímeros de silicone, encontram-se disponíveis vários  $K_{pw}$ , determinados com precisão para vários



contaminantes (Yates *et al.*, 2007; Smedes *et al.*, 2009). Para além disso, existe uma boa concordância entre a teoria hidrodinâmica e os valores de  $R_s$  experimentais para estes AP (Rusina *et al.*, 2010). Também existem valores de  $K_{pw}$  para alguns COH e seus compostos de referência amostrados com LDPE (Müller *et al.*, 2001; Booij *et al.*, 2002). No entanto, esses parâmetros foram maioritariamente determinados em condições laboratoriais controladas, podendo não refletir as verdadeiras variações ambientais que ocorrem durante a amostragem passiva. No primeiro estudo, esses valores foram estimados através de ensaios de campo. Porém, apenas foram utilizadas duas amostras de água, pelo que poderão não ser representativos.

#### 4. FATORES AMBIENTAIS QUE AFETAM OS VALORES DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Existem já alguns estudos sobre a influência dos fatores ambientais sobre  $R_s$  e  $K_{pw}$ . Vrana *et al.* (2005) refere os efeitos da agitação marinha e do *biofouling* sobre a amostragem passiva. Tal como já foi referido, quando se utilizam AP monofásicos no meio aquático, a transferência dos contaminantes para a fase recetora é primeiramente controlada pela sua difusão através da interface água-AP. A turbulência afeta a espessura dessa camada limite, com consequências na transferência de massa dos analitos. Por outro lado, quando se forma um filme biológico na superfície do amostrador, a interface água-AP é afetada com consequências óbvias sobre as taxas de amostragem. De acordo com Vrana *et al.* (2005) esses constrangimentos são ultrapassados com a utilização de PRC e com materiais que evitam o desenvolvimento de organismos. No entanto, Allan *et al.* (2016) demonstram que, por serem fotossensíveis, pode ocorrer fotodegradação de PAH deuterados, utilizados como PRC, provocando desvios aos valores de  $R_s$ . Este efeito é particularmente pertinente na amostragem de águas superficiais e oligotróficas. Embora os autores não tenham conhecimento sobre estudos que abordem essa questão, a degradação biológica também pode ser um fator importante.

Relativamente à salinidade e temperatura, estes fatores foram estudados por Jonker *et al.* (2015) que propõem expressões matemáticas para ajustar os valores de  $K_{pw}$  às condições específicas de salinidade e temperatura do meio amostrado.

Outro fator que pode contribuir para as incertezas na estimativa de  $R_s$  e  $K_{pw}$  é a presença de diferentes tipos de matéria orgânica (MO). Dependendo da massa molecular e hidrofobicidade, as interações entre a MO e os COH, afetam o seu transporte, partição, e biodisponibilidade (Ackanen *et al.*, 2002; Haftka *et al.*, 2010). Como consequência, o equilíbrio de absorção na amostragem passiva poderá ser afetada, de diferentes formas, dependendo da concentração e natureza da MO, bem

como das condições físico-químicas do meio (Ackanen *et al.*, 2002; Haftka *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011).

#### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma a contribuir para a utilização de AP monofásicos na monitorização de contaminantes orgânicos hidrofóbicos, foi efetuado um estudo bibliográfico sobre a ação, individual ou combinada, de diversos fatores ambientais sobre os parâmetros de calibração,  $R_s$  e  $K_{pw}$ .

Embora este tipo de AP tenha sido bastante testada, existindo valores de  $R_s$  e  $K_{pw}$  considerados como de referência para uma larga gama de  $\log K_{ow}$ , estudos interlaboratoriais, mostram variabilidades que próximas de 0,2 unidades logarítmicas, devidas essencialmente a aspetos relacionados com o controlo das condições ambientais de ensaio (Lohmann *et al.*, 2012; Booij *et al.*, 2017).

Pelo que foi possível averiguar, ainda existem poucos estudos, sobre a influência dos diferentes fatores ambientais na amostragem passiva. Particularmente, parecem existir lacunas de conhecimento sobre a verdadeira influência dos seus efeitos combinados sobre os valores estimados para os parâmetros de calibração,  $R_s$  e  $K_{pw}$ , e incertezas associadas.

Assim, torna-se necessário efetuar ensaios laboratoriais de exposição AP-COH em diferentes condições ambientais, incluindo a presença de MO ou outras substâncias interferentes, em paralelo com ensaios de campo representativos.

#### REFERÊNCIAS

- Ackanen J, Tuikka A., Kukkonen J. V. K. (2002) On the borderline of dissolved and particulate organic matter. Partitioning and bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 78, 91–98.
- Booij, K., Smedes, F. e van Weerlee, E. M. (2002) Spiking of performance reference compounds in low density polyethylene and silicone passive water samplers, *Chemosphere*, 46, 1157–1161.
- Booij, K. e Smedes, F. (2010) An Improved Method for Estimating in Situ Sampling Rates of Nonpolar Passive Samplers, *Environmental Science and Technology*, 44, 6789–6794.
- Booij, K., Robinson, C. D., Burgess, R. M., Mayer, P., Roberts, C. A., Ahrens, L., Allan, I. J., Brant, J., Jones, L., Kraus, U. R., Larsen, M. M., Lepom, P., Petersen, J., Pröfrock, D., Roose, P., Schäfer, S., Smedes, F., Tixier, C., Vorkamp, K. e Whitehouse, P. (2016) Passive Sampling in Regulatory Chemical Monitoring of Nonpolar Organic Compounds in the Aquatic Environment, *Environmental Science and Technology*, 50, 3–17.
- Booij, K., Smedes, F. e Allan, I. J. (2017) Guidelines for determining polymer-water and polymer-polymer partition coefficients of organic

- compounds, ICES Techniques in Marine Environmental Sciences N° 61, *International Council for the Exploration of the Sea*, Copenhagen, 19 pp.
- CE (2008a) Diretiva 2008/56/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 17 de Junho, que estabelece um quadro de ação comunitária no domínio da política para o meio marinho (Diretiva-Quadro da Estratégia Marinha), *Jornal Oficial da União Europeia* L 164 de 25/6/2008, 19-22.
- CE (2008b) Diretiva 2008/105/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa a normas de qualidade ambiental no domínio da política da água, *Jornal Oficial da União Europeia* L 348 de 24/12/2008, 84-97.
- CE (2009) Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC, Guidance Document No. 19. Guidance on Surface Water Chemical Monitoring under the Water Framework Directive, 17 pp.
- CE (2013) Diretiva 2013/39/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de Agosto, que altera as Diretivas 2000/60/CE e 2008/105/CE no que respeita às substâncias prioritárias no domínio da política da água, *Jornal Oficial da União Europeia* L 226 de 24/8/2013, 1-17.
- Gorecki, T. e Namiesnik, J. (2002) Passive Sampling, *Trends in: Analytical Chemistry*, 21, 276-290.
- INCM (2007) “Portaria 1450/2007, de 12 de Novembro”, *Diário da República*, 1ª série, N° 217, pp 8372, Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Lisboa.
- INCM (2015) “Decreto-Lei n.º 218/2015, de 7 de Outubro”, *Diário da República*, 1ª série, N° 196, pp 8667, Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Lisboa.
- Jonker, M.T.O., van der Heijden, S.A., Kotte, M. e Smedes, F. (2015) Quantifying the effects of temperature and salinity on partitioning of hydrophobic organic chemicals to silicone rubber passive samplers. *Environmental Science Technology*, 49, 6791-6799.
- Lohmann, R., Booij, K., Smedes, F. e Vrana B. (2012) Use of passive sampling devices for monitoring and compliance checking of POP concentrations in water, *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 1885-1895.
- Müller, J. F., Manomani, K., Mortimer M. R., McLachlan M. S. (2001) Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in the polyethylene/water system, *Fresenius J. Anal. Chem.*, 371, 816-822.
- Miège, C., Mazzella, N., Allan, I., Dulio, V., Smedes, F., Tixier, C., Vermeirssen, E., Brant, J., O’Toole, S., Budzinski, H., Ghestem, J.-P., Staub, P.-F., Lardy-Fontan, S., Gonzalez, J.-L., Coquery, M. e Vrana, V. (2015) Position paper on passive sampling techniques for the monitoring of contaminants in the aquatic environment – Achievements to date and perspectives, *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 8, 20-26.
- OSPAR (2015) “OSPAR Joint Assessment Program (JAMP) 2014-2021. Update 2015 (Agreement 2014-02)”, Comissão OSPAR, Londres, 59 pp.
- Reitsma, P., Adelman, D., e Lohmann, R. (2013) The challenges of using polyethylene passive samplers to determine dissolved concentrations of parent and alkylated PAH under cold and saline conditions, *Environmental Science and Technology*, 47, 10429-10437.
- Smedes, F., Geertsma, R. W., van der Zande, T. e Booij K. (2009) Passive Polymer-Water Partition Coefficients of Hydrophobic Compounds for Passive Sampling: Application of Cosolvent Models for Validation, *Environmental Science and Technology*, 43, 7047-7054.
- Smedes, F., Bakker, D. e de Weertand J. (2010) The use of passive sampling in WFD monitoring. The possibilities of silicon rubber as a passive sampler, *Deltares, Rijkswaterstaat Centre for Water Management*, Holanda, 59 pp.
- Smedes, F. e Booij, K. (2012) Guidelines for passive sampling of hydrophobic contaminants in water using silicone rubber samplers, *ICES Techniques in Marine Environmental Sciences* N° 52, International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, 19 pp.
- Stuer-Lauridsen. F. (2005) Review of passive accumulation devices for monitoring organic micropollutants in the aquatic environment, *Environmental Pollution*, 136, 503-524.
- Rusina, T. P., Smedes, F., Klanova, J., Booij, K. e Holoubek, I. (2007) Polymer selection for passive sampling: A comparison of critical properties, *Chemosphere*, 68, 1344-1351.
- Rusina, T. P., Smedes, F., Koblizkova, M. e Klanova J. (2010) Calibration of Silicone Rubber Passive Samplers: Experimental and Modeled Relations between Sampling Rate and Compound Properties, *Environmental Science and Technology*, 44, 362-367.
- Vrana, B., Mills, G. A., Allan, I. J., Dominiak, E., Svensson, K., Knutsson, J., Morrison, G. e Greenwood, R. (2005) Passive sampling techniques for monitoring pollutants in water, *Trends in Analytical Chemistry*, 24, 845-867.
- Vrana, B., Smedes, F., Prokeš, R., Loos, R., Mazzella, N., Miège, C., Budzinski, H., Vermeirssen, E. e Ocelka, T. (2016) An interlaboratory study on passive sampling of emerging water pollutants. *Trends in Analytical Chemistry*, 76, 153-165.
- Yates, K., Davies, I., Webster, L., Pollard, P., Lawton, L. e Moffat, C. (2007) Passive sampling: partition coefficients for a silicone rubber reference phase, *Journal of Environmental Monitoring*, 9, 1116-1121.

## Problemas ambientais relacionados com a dragagem de sedimentos poluídos

R. M. Fonseca (1), C. Palma (2)

(1) Departamento de Geociências, Escola de Ciências e Tecnologia, Instituto de Ciências da Terra (ICT), Laboratório AmbiTerra, Universidade de Évora, rfonseca@uevora.pt

(2) Instituto Hidrográfico, Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho.

**Resumo:** A dragagem é uma das técnicas mais eficientes na recuperação de um corpo de água, sendo a única capaz de remover total ou parcialmente os sedimentos, local preferencial de acumulação e retenção de elementos poluentes. É um método economicamente viável quando comparado com outros programas de reabilitação e uma das grandes vantagens relativamente a métodos químicos ou biológicos, é a não introdução de substâncias estranhas no sistema. A sua eficácia depende de um prévio controlo do material que é lixiviado da bacia, da morfologia e hidrologia do sistema hídrico e das características químicas/biológicas do material depositado. A remoção dos sedimentos poderá ter impactos negativos, sendo por vezes uma metodologia desaconselhada num projeto de recuperação. Apresentam-se os principais problemas associados à dragagem e os estudos prévios que deverão realizar-se para a proposta de uma metodologia de reabilitação correcta, exemplificados através de um estudo de caso no Estado de Minas Gerais (Brasil).

**Palavras-chave:** contaminação, dragagem, impactos ambientais, remediação, sedimentos

### 1. INTRODUÇÃO

O principal objectivo de um projecto de recuperação de um sistema aquático poluído é o de encontrar técnicas adequadas que melhorem a qualidade da água o suficiente para se poder comparar a padrões locais. Na proposta destes projectos deverão ser obrigatoriamente incluídos dois pontos principais: (1) aplicação de correctas e efectivas medidas de gestão e controle das fontes pontuais na bacia antes de qualquer intervenção, e (2) estudos detalhados dos sedimentos, material em suspensão e massa de água, para a proposta de uma metodologia de reabilitação correcta, com eficiência a longo prazo e sem impactos nocivos para o ambiente. Esses estudos deverão ainda apoiar a escolha do processo mais adequado às características do sistema de forma a assegurar a sua eficácia.

As tecnologias de remediação para sedimentos aquáticos contaminados são muito complexas e podem ter de envolver uma combinação de metodologias físicas, químicas e biológicas dado que estes materiais representam os últimos repositórios de contaminantes no meio, em resultado de processos de escorrência, infiltração e deposição (Siegel, 2002; Reible e Lanczos, 2007). A maior parte das tecnologias são difíceis de aplicar neste tipo de materiais sedimentares e impõem riscos potenciais inaceitáveis, podendo-se dividir em quatro tipos diferentes de abordagens (US EPA, 1994; Reis *et al.*, 2007):

1. No isolamento dos materiais contaminados, através da colocação de coberturas superficiais ou barreiras laterais de forma a impedir o alastramento da contaminação;

2. Na imobilização da contaminação, por solidificação ou fusão do material adjacente, o que leva a uma estabilização dos contaminantes e uma resistência à lixiviação;

3. Na redução da toxicidade ou redução da mobilidade dos contaminantes, através da utilização de tratamentos biológicos ou químicos;

4. Na remoção dos sedimentos contaminados através de dragagem, com o subsequente disposição e tratamento.

Cada metodologia tem benefícios e limitações com respeito ao tempo que leva para remoção total dos contaminantes, ao custo e a outro tipo de problemas, como os relacionados com a disposição do material a tratar.

A dragagem é considerada com uma das técnicas mais eficientes e com resultados permanentes ou de longa duração no que diz respeito ao aumento da capacidade de assimilação de um corpo de água, por ser a única técnica capaz de remover total ou parcialmente os sedimentos, local preferencial de acumulação e retenção de elementos e/ou compostos poluentes (MACTEC Project, 2008; OSPAR Commission, 2008; Manap e Voulvoulis, 2014). É uma tecnologia de remediação que poderá ser aplicada de forma isolada ou usada em combinação com processos de recuperação monitorizados e/ou com coberturas com materiais diversos (*capping*). É uma técnica vulgarmente utilizada na recuperação de lagos naturais ou artificiais, estuários, zonas costeiras, canais e linhas de água, eutrofizados ou contaminados. Embora com custos elevados, a dragagem poderá ser um método economicamente viável quando comparado com outros programas de controlo da sedimentação e duas das grandes vantagens relativamente a métodos químicos ou

biológicos de remediação, é o facto de não contribuir para a introdução no sistema de substâncias estranhas que poderão ter efeitos de poluição secundária (US EPA, 1981; Alan Plummer Associates, 2005) e a mais curta duração das operações relativamente a outras metodologias de descontaminação.

A sua eficácia depende, porém, de diversos factores: (1) prévio controlo do material que é lixiviado da bacia, através da implementação de técnicas eficientes de minimização de transporte de partículas e de elementos solúveis para as linhas de água, (2) morfologia e hidrologia dos corpos de água (topografia do fundo, batimetria, espessura dos sedimentos depositados) e prévio conhecimento dessas características, (3) características químicas, (teor e mobilidade de elementos contaminantes, identificação e /quantificação das frações minerais ou orgânicas às quais estão associados), físicas (textura, densidade, permeabilidade, porosidade) e mineralógicas (identificação de minerais argilosos e avaliação da sua capacidade de retenção, sais solúveis e minerais secundários com elementos poluentes na sua estrutura) do material depositado e conhecimento da sua distribuição espacial e temporal, (4) utilização de um sistema de dragagem ambientalmente correcto que provoque baixa taxa de ressuspensão dos sedimentos e (5) conhecimento dos possíveis impactos da dragagem na qualidade da água.

Os pontos 2), 3) e 5) permitirão: *i)* a escolha da metodologia de dragagem mais apropriada, *ii)* o conhecimento das condições operacionais mais adequadas como, a velocidade de extração, a potência, a rotação da cabeça de corte da draga, a profundidade de corte no sedimento, a largura do *pipeline* usado no transporte do sedimento removido para a margem e, *iii)* a extração seleccionada de diferentes espessuras de sedimento em função das suas características e profundidade de contaminação.

## 2. IMPACTOS DA DRAGAGEM DOS SEDIMENTOS NO MEIO

Nenhum método de remediação consegue remover, conter ou tratar materiais sedimentares contaminados sem nenhum distúrbio e consequente libertação de contaminantes. Os sedimentos são espacialmente muito variáveis, têm elevado volume e representam sistemas dinâmicos sujeitos a variações de fluxos sazonais e eventos climáticos diversos. Apresentam problemas especiais dado que estão sob a acção de águas que fluem e/ou que circulam subterraneamente, o que provoca uma dispersão e difusão dos elementos poluentes (Siegel, 2002, Reible e Lanczos, 2007). Qualquer metodologia que se utilize para remover a contaminação tem de ter em conta o efeito de enormes volumes de água associados. Deste modo, é necessário conhecerem-se os factores que poderão mobilizar e imobilizar os

contaminantes nos sedimentos, tais como, modificações de pH, das condições de redução e oxidação, de complexação orgânica e inorgânica, de mediação microbiológica.

A dragagem dos sedimentos poderá ter alguns impactos negativos que terão de ser avaliados num projeto de recuperação (US EPA, 1981; Holdren *et al.*, 2001; Siegel, 2002; Alan Plummer Associates, 2005; MACTEC Project, 2008). Tendo em conta a multiplicidade de processos envolvidos nesta operação, onde se incluem: remoção dos sedimentos, transporte, disposição (líquidos e sólidos) e tratamento (Palermo e Hays, 2014), para que ela seja eficaz terá de existir uma boa coordenação entre todos, o que nem sempre é fácil. O mau funcionamento de um dos processos, torna ineficaz toda a complexa operação de dragagem.

### 2.1. Remoção dos sedimentos

A remoção dos sedimentos envolve certos impactos que terão de ser acautelados. De entre eles, destacam-se: *i)* perda de material durante a remoção, *ii)* ressuspensão (dispersão dos sedimentos na coluna de água), *iii)* libertação (perda de contaminantes a partir da água intersticial ou das partículas de sedimentos ressuspensos, para a coluna de água ou para o ar) e *iv)* produção de resíduos (sedimentos que permanecem no leito do corpo de água adjacentes ao local de dragagem, após o término das operações de remoção).

*i)* Para além do material que se perde a partir da cabeça de corte do equipamento de dragagem, também o transporte dos sedimentos contaminados poderá levar a algumas perdas e dispersão, introduzindo contaminantes em áreas anteriormente descontaminadas;

*ii)* Mesmo utilizando metodologias ambientalmente correctas, existe sempre uma ressuspensão de sedimentos na coluna de água, o que contribui para uma redução da sua qualidade. O risco associado a este material ressuspenso depende das características físico-químicas dos sedimentos, da natureza dos contaminantes e do seu comportamento geoquímico quando ocorrem modificações das condições físico-químicas do meio. O risco da ressuspensão diminui quando os sedimentos a remover têm baixa percentagem de fracção fina e o sistema possui baixo tempo de residência hidráulico e alguma drenagem, de forma a diminuir o tempo de permanência das partículas em suspensão na coluna de água quando os sedimentos sofrem remeximento.

*iii)* No caso de os elementos contaminantes serem metais pesados, dependendo das características físico-químicas dos sedimentos, os seus níveis na coluna de água poderão potencialmente aumentar, devido a um aumento das condições de oxidação inerentes ao remeximento dos sedimentos, com a consequente libertação deste elementos e/ou compostos metálicos anteriormente retidos por precipitação ou adsorção em diversas formas

minerais e orgânicas em condições redutoras. Neste caso, a dragagem é desencorajada, como opção de limpeza de sedimentos, em particular se os contaminantes forem metais que aumentem a sua mobilidade e biodisponibilidade em condições oxidantes (Siegel, 2002).

iv) Em corpos de água com distribuição irregular dos sedimentos, a operação de remoção do material por dragagem deverá ser dificultada e conduzir à produção de quantidades consideráveis de resíduos. Estes podem ser agrupados em duas categorias (Palermo e Hays, 2014): *i*) resíduos não perturbados: correspondem a sedimentos contaminados que não foram totalmente removidos pela dragagem e *ii*) resíduos gerados: correspondem a sedimentos contaminados que foram deslocados ou ressuspensos pelas operações de dragagem e que foram posteriormente re-depositados no leito do corpo de água. Os dois tipos de resíduos apresentam diferentes riscos para o meio e podem requerer diferentes métodos de prevenção e diferentes respostas de gestão e de monitorização. Dados compilados nos últimos anos a partir de um número considerável de projectos de dragagem, indicam que os resíduos podem conter entre 5 a 9% da massa de contaminantes removida pela dragagem (Patmont, 2006).

No caso de existir quantidade apreciável de resíduos após as operações de remoção, é usual utilizar-se uma fina cobertura de material limpo (*capping*), de forma a fornecer a curto prazo um isolamento do material contaminado e a reduzir a longo prazo a contaminação superficial. Este material pode ser constituído por areia, zeólitos, argilas bentónicas, geotêxteis, com potencial para reduzir a biodisponibilidade dos elementos contaminantes (Palermo e Hays, 2014).

## 2.2. Transporte, disposição e tratamento dos sedimentos

Frequentemente, os maiores problemas associados à dragagem são o transporte, a disposição e o tratamento dos materiais removidos, sendo normalmente estes que aumentam os custos desta tecnologia.

*i*) Após a remoção, o material tem de ser transportado para uma área de decantação de forma a desidratar e seguidamente para a área do seu processamento, tratamento ou disposição final. O transporte tem de estar ligado aos processos de dragagem e pode envolver diferentes meios: através de *pipeline*, barcas, camião, etc. A primeira etapa do transporte é a deslocação do sedimento para os locais de decantação e desidratação, seguindo-se posterior deslocação para os locais de pré-tratamento, tratamento e/ou disposição final. O transporte, para além de acarretar custos elevados, pode sempre aumentar os riscos de contaminação ao poderem ser lixiviados ou arrastados materiais contaminados em locais anteriormente não poluídos;

*ii*) A disposição refere-se à colocação do material dragado em estruturas temporárias ou permanentes de forma a prevenir a contaminação associada aos sedimentos e resíduos e que possam vir a ter forte impacto na saúde humana e no ambiente (Palermo e Hays, 2014). É a etapa que implica maiores custos e maiores problemas logísticos, uma vez que são necessários locais adequados, bem impermeabilizados, sendo muitas vezes realizado o tratamento dos materiais contaminados para a diminuição do seu volume.

*iii*) O tratamento pode consistir na separação física das fracções não contaminadas (normalmente as fracções mais grosseiras, da dimensão do cascalho e da areia possuem uma menor capacidade de adsorção de elementos contaminantes), de modo a reduzir o volume do material a tratar. Os processos de tratamento dos materiais de textura mais fina, onde os contaminantes geralmente se concentram, são muito diversos e, geralmente, baseiam-se na redução da toxicidade e mobilidade dos elementos contaminantes antes da sua disposição final (Mulligan *et al.*, 2001; Khan *et al.*, 2004; Reis *et al.*, 2007; Palermo e Hays, 2014).

## 3. CASO DE ESTUDO

A análise geoquímica realizada numa área industrial de produção de ligas metálicas de zinco, no Estado de Minas Gerais, Brasil, indicou a presença, em materiais sedimentares de um pequeno afluente do rio São Francisco e respectiva planície aluvionar, de elevados índices de contaminação de Zn-Cd-Pb-Cu-As-Ni, a maior parte deles em formas facilmente mobilizáveis (solúveis, como catiões de troca, associados a óxidos de manganês).

De forma a propor metodologias de remediação efectivas, de verificar o comportamento dos metais e avaliar a sua perigosidade ambiental durante uma operação de remoção dos sedimentos, simulou-se em laboratório um processo de dragagem invasivo em sectores específicos desse curso d'água, utilizando sedimentos e água amostrados simultaneamente e respeitando a relação espessura do material/altura da coluna de água. Pretendeu-se determinar o efeito do remeximento dos sedimentos na qualidade da água, de forma a compreender as principais limitações associadas à utilização da dragagem como método de remediação da área. Amostras foram agitadas continuamente durante 24 Horas, tendo-se realizado dois tipos de ensaios: (1) recolha de duas sub-amostras: uma filtrada (representando material dissolvido) e outra digerida em solução ácida (representando material dissolvido+particulado) e (2) recolha e leituras da turbidez imediatamente após agitação, após 1 hora de repouso, 2 horas, 8 horas, 24 horas, 48 horas, 96 horas e 7 dias. Em todas as amostras analisaram-se o pH, a condutividade eléctrica e os teores dos elementos metálicos foram lidos através de ICP-OES.

As análises geoquímicas permitiram desaconselhar a utilização da dragagem como técnica de remediação dos sedimentos pelas seguintes razões: (1) indicaram a presença de elevados índices de contaminação de metais pesados em formas facilmente solubilizáveis, que se mantinham em formas reactivas mesmo 7 dias após a dragagem, (2) estes metais, associados às partículas minerais dos sedimentos em estado reduzido, aumentam a mobilidade em condições oxidantes, pelo que qualquer remeximento do material desencadeado pelas operações de dragagem libertaria grandes quantidades destes elementos para a coluna de água, (3) a dragagem teria eficácia apenas a curto prazo dado que a contaminação se fazia fundamentalmente através da difusão de sais em solução nas águas intersticiais e subterrâneas. A remoção dos sedimentos, que implicaria custos muito elevados, não seria uma tecnologia de descontaminação com resultados permanentes ou duradouros, dado que este curso de água está continuamente a ser alimentado pelos fluxos de água que circulam nos espaços intersticiais dos materiais aluvionares e que têm concentrados elevados teores de metais potencialmente tóxicos.

#### 4. CONCLUSÕES

Antes de se projectar um programa de dragagem, para além de uma caracterização completa da área, incluindo morfologia do corpo de água e características químicas, físicas e mineralógicas dos sedimentos, é de ter em conta todas as limitações desta tecnologia que possam inviabilizar o seu recurso para remediação de sedimentos contaminados e propor uma outra metodologia de reabilitação, eficiente e com um menor número de impactos nocivos para o ambiente.

Dada a complexidade dos processos e os elevados custos associados a estes programas de remediação, para além de uma completa caracterização do meio, é essencial fazer-se um estudo piloto para testar a eficiência da tecnologia de remoção ou imobilização dos elementos poluentes nos materiais que se pretendem descontaminar. Para um melhor dimensionamento dos ensaios à escala piloto, é importante conhecer-se a reacção do material aos métodos propostos, pelo que, é igualmente imprescindível fazer-se a aplicação destas técnicas à escala laboratorial, de forma a se poderem controlar todos os factores, conhecer-se o comportamento químico e físico e a resposta do meio à sua variação. Só com estes estudos prévios será possível apresentar-se uma proposta de reabilitação com eficiência a longo prazo e ambientalmente correcta.

#### REFERÊNCIAS

Alan Plummer Associates (2005). *Dredging vs New Reservoirs*. Texas Water Development Board. TWDB Contract 2004-483-534.

Holdren, C., Jones, B., Taggart, J. (2001). *Managing lakes and reservoirs*. North American Lake Management Society. 400 pp.

Khan, F. I., Husain, T., Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, 71, 95-122.

MACTEC Project (2008). *Dredging as a Restoration Tool For Lake Water Quality Improvement*. Updated for: St. Johns River Water Management District. MACTEC Project Number 6063070098.

Manap, N., Voulvoulis, N. (2014). Risk-based decision-making framework for the selection of sediment dredging option. *Science of the Total Environment*, 496, 607–623.

Mulligan, C. N., Yong, R. N., Gibbs, B. F. (2001). An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 85, 145-163.

OSPAR Commission (2008). *Assessment of the environmental impact of dredging for navigational purposes*. 18 pp.

Palermo, M., Hays, D. (2014). Sediment Dredging, Treatment and Disposal. In D.D. Reible (ed.), *Processes, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments*. Springer Science + Business Media New York, 365-391.

Patmont, C. (2006). *Contaminated sediment dredging residuals: Recent monitoring data and management implications*. National Research Council Committee on Sediment Dredging.

Reible, D., Lanczos, T. (2007). *Assessment and remediation of contaminated sediments*, Vol. 73, Springer Science & Business Media. DOI 10.1007 / 978-1-4020-4959-0, 238 pp.

Reis, E., Lodolo, A., Miertus, S. (2007). Survey of sediment remediation technologies. International Centre for Science and High Technology. 124pp.

Siegel, F. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer Verlag, 218p.

US EPA (1981). *Sediment Removal as a Lake Restoration Technique*. Corvallis Environmental Research Laboratory, 61 pp.

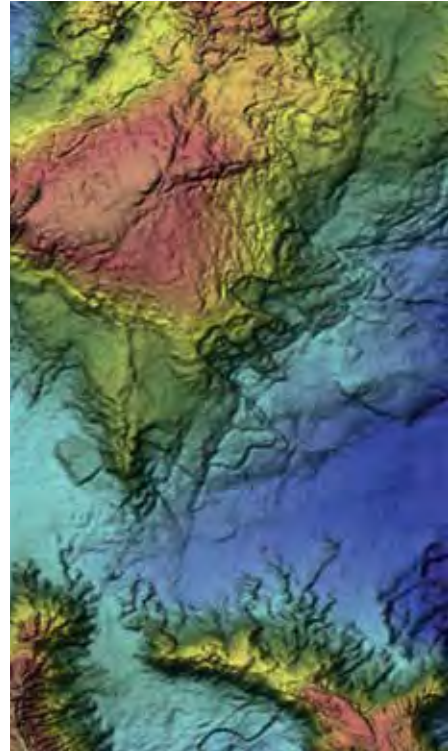
US EPA (1994). *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program. Assessment Guidance Document*. EPA-905-B94-002. Great Lakes National Program Office.

Nota: este documento não utiliza o novo acordo ortográfico.



# GEOLOGIA MARINHA

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA







## Bottom sediments mineralogical and textural variability in the Madeira shelf

A. Oliveira (1), A.I. Santos (1,2) e S. Cunha (2)

- (1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa; anabela.oliveira@hidrografico.pt  
 (2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal  
 (3) Instituto Hidrográfico/Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

**Abstract:** Aiming for habitat mapping and sediment cartography, a total of 47 superficial sediment samples were collected in august 2017 in the Madeira insular shelf (Ponta do Pargo and Ponta de S. Lourenço). In the Madeira shelf two main sediment sources can be identified: terrestrial and marine. Preliminary results show the presence of sandy sediments with a basaltic origin in the western tip (Ponta do Pargo) near the coast with a mineralogical composition made up mainly of clinopyroxenes (diopside/augite), Ca/Na plagioclase feldspar (anorthite), magnetite and with olivine and hematite as accessory minerals. Below ~70 m water depth the coarse sediment cover is made up of marine carbonates (Calcite Mg, calcite and aragonite) formed by shells, echinoderms, bryozoan, rhodoliths and coral remains. To the southeast, near coast the sediment becomes finer with an increase of terrestrial source minerals, but between Madeira Island and Desertas the sediment is also coarser and the marine biogenic remains prevail. Four different sediment types are described.

**Key-words:** sediments, Madeira island, minerals, shelf, grain-size.

### 1. INTRODUCTION

Aiming for habitat mapping and sediment cartography a sediment sampling campaign was performed, by the Instituto Hidrográfico (IH), in the shelf near the western (Ponta do Pargo) and eastern (Ponta de S. Lourenço) tips of the Madeira Island. This campaign intended to be complementary to the ones executed in 2002 and 2007 by IH (*see Rodrigues et al., 2004; Instituto Hidrográfico, 2003 e 2007*).

Madeira Island shelf terrigenous sediments derive mainly from the weathering of alkaline basaltic rocks and the sediments are introduced in marine environment by cliff erosion and floods (torrential regime).

Morphologically, Ponta do Pargo corresponds to a 30 km wide abrasion submarine platform, with reduced sedimentary cover (Instituto Hidrográfico, 2003). A submarine ridge connects Ponta de S. Lourenço to the Desertas islands, rising from 1000 m water depth up to 200 m, characterized by intense upwelling phenomena (Caldeira *et al.* 2002).

In this paper, grain-size and mineralogical assemblages of bottom sediment samples will be used in order to outline the main deposits and identify terrigenous/marine sediment sources.

### 2. MATERIAL AND METHODS

In August 2017, onboard the Navy research vessel “NRP Auriga”, a total of 47 superficial sediment

samples were collected, using a Smith-McIntyre grab (fig.1).



Fig 1. Sediment samples collected during Madeira 2017 campaign.

The study area comprehends the west and east flanks of the Madeira insular shelf, in the seaward direction up to 900 m water depth.

All samples were observed and photographed under a stereomicroscope (LEICA MZ16), with maximum magnification of 115x. Bottom sediments grain-size was analyzed by laser forward-scattering in a Malvern 2000 equipment, completed by sieving, for particles coarser than 500  $\mu\text{m}$ .

Due to the diverse and coarse nature of the sediment, mineralogical analysis was performed in the <500 $\mu\text{m}$  fraction. After sieving, the sediment was reduced to dust using a McCrone micronizing mill in distilled water (for 5 minutes), evaporated to dryness at 40°C, and pulverized using agate mortar, in order to obtain a crystallite size below 10 $\mu\text{m}$ , and finally analyzed by X-ray diffraction (*see Oliveira et al., 2007, for more details*).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The collected sediments were mainly sands (mean: 83%; max: 99.6%; min: 24.5%) with some gravel (mean: 7%; max: 40%; min: 0%) and low content of silt and clay (8 % and 2%, respectively). Near the coast the fine fraction is almost absent increasing with depth (>100m depth). The gravel component, generally formed by biogenic remains, is more significant (>20%) at depths around 75-85m, at Ponta do Pargo and 95-125m at Ponta de S. Lourenço (fig.2).

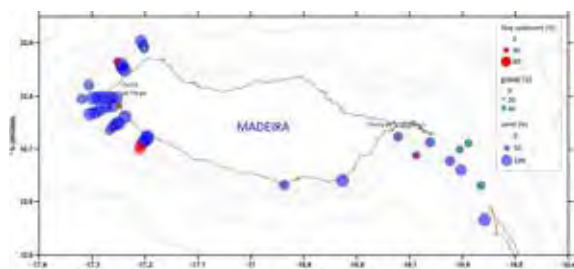


Fig. 2. Samples textural distribution map, including sands, gravel and fine sediments (silt+clay %) percentage.

In the Madeira shelf, the mineralogical composition allowed for the identification of two main sediment sources: terrestrial (subaerial rock erosion) and marine (biogenic remains). The terrestrial particles consisted of alkaline volcanic rocks fragments and minerals as: clinopyroxenes (diopside Ti-diopside, augite), magnetite, hematite, olivine (forsterite) and plagioclase (anorthite). Marine particles include biogenic remains rich in magnesian calcite (echinoids, ostracods, bryozoans, and ringworms), aragonite (gastropods shells, bivalves, corals) and calcite (foraminifera, red calcareous algae).

In order to discriminate sediment types, the identified minerals were grouped by major compounds in silicates (clinopyroxene + plagioclase + olivine), iron oxides (magnetite+hematite) and carbonates (magnesium calcite + aragonite + calcite). This grouping allowed the distinction of 4 sediment types (fig. 3 and fig.4).

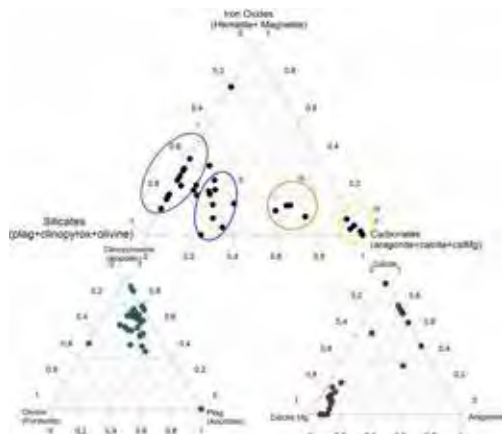


Fig. 3. Ternary diagram with the X-ray main mineralogical analysis. The four color circles represents the 4 considered

sediment types (grey circle- type I; blue circle-type II, orange circle -type III and yellow circle -type IV).

Type I - Terrigenous (siliciclastic dominated sediments) with mean values of 68% of silicates and 32% of iron oxides; dominant sand component (95%);

Type II - Mixed siliciclastic-bioclastic sediment, with mean values of 61% silicates, 20% carbonates and 19% iron oxides; sand component decreases slightly (72 %) and increased silt component (20%);

Type III - Mixed bioclastic-siliciclastic sediment, with mean values of 27% silicates, 59% carbonates and 14% iron oxides; dominant sand component (83%), gravel 9 % and silt 4%.

Type IV - Bioclastic (carbonate dominated sediment), with mean values of 98% carbonates and 2% iron oxides; dominant sand (80%) and gravel (18%) components.

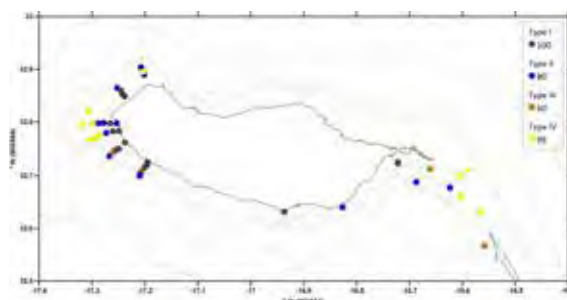


Fig. 4. Distribution map of the identified mineralogical sample types and respective photo.

Geographically, Type I, is distributed mainly near the coast up to water depths of 144 m, showing an increase of iron oxides with depth;

Type II, has no depth limits but is the only type occurring above 200 m depth (with one exception, one sample Type IV, collected in Ponta de S. Lourenço);

Type III, is very limited (only 4 samples), appearing between 90 and 150 m depth;

Type IV, is present at specific depths ranges, in Ponta do Pargo (70-100 m depth), and Ponta de S. Lourenço (95 m – 440 m depth).

Taking in account both the stereomicroscope observations (fig.5) and the textural analysis (fig. 6), some particularities in the sediment types can be observed:

Type I: sediments are mainly coarse to medium sands, unimodal, moderately sorted, with the

presence of abundant rolled to sub-rolled siliciclastic grains (fig. 5A1 and B1);

Type II: sediments are mainly medium to fine sands, also unimodal but moderately to very poorly sorted, showing an increase of fine particles (silt+clay) with depth; the siliciclastic grains are also sub-rolled with the presence of some biogenic remains (bryozoans, foraminifera, ostracods) (fig. 5.A2 and B2);

Type III: sediment is formed by medium to coarse sand, presenting bi to polimodal curves, poorly to very poorly sort. The siliciclastic particles are better sorted than biogenic particles that are coarser and partially broken (fig. 5. A3 and B3);

Type IV: very coarse biogenic sand, with an important component of gravel, especially in the samples collected in Ponta de S. Lourenço (>35%); sediments are moderately to very poorly sorted, with unimodal and bimodal curves mostly those from Ponta de S. Lourenço. In Ponta do Pargo samples, the great majority of the 500  $\mu\text{m}$  biogenic particles are broken, worn out and present a red/orange color, indicative of a relict sediment (fig.5. A4). Samples from Ponta de S. Lourenço are also broken but without this patina (fig.5. B4).

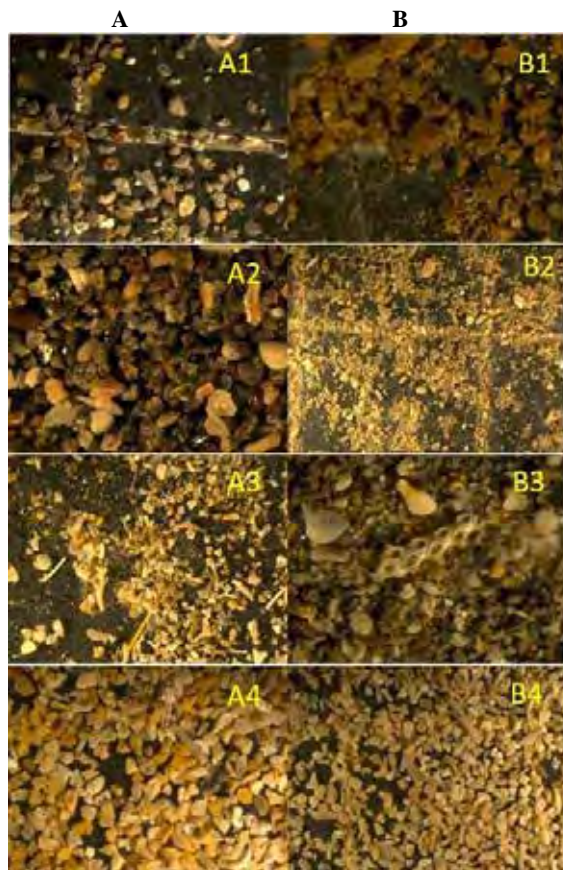


Fig. 5. Sediment stereomicroscope photos: column A (P. do Pargo) and B (P. S. Lourenço): A1 and B1) Type I sediment; ampl. 12,5x and ampl. 50x; A2 and B2) Type II, ampl. 63x and ampl.10x; A3 and B3) Type III, amp.20x and ampl.40x; A4 and B4) Type IV ampl.12.5x and ampl. 10x.

Sediment types I, III and IV distribution, appears to depend of the distance to the coast and depth. On the other hand, type II, richer in fine fraction (fig. 6) and incorporating siliciclastic particles and some recent calcite biogenic shells (foraminifera), are found in very different locations and depths. Distribution of these sediments types represent an equilibrium of the sedimentary cover with the present dynamic processes and also transport of type II sediments for deeper areas.

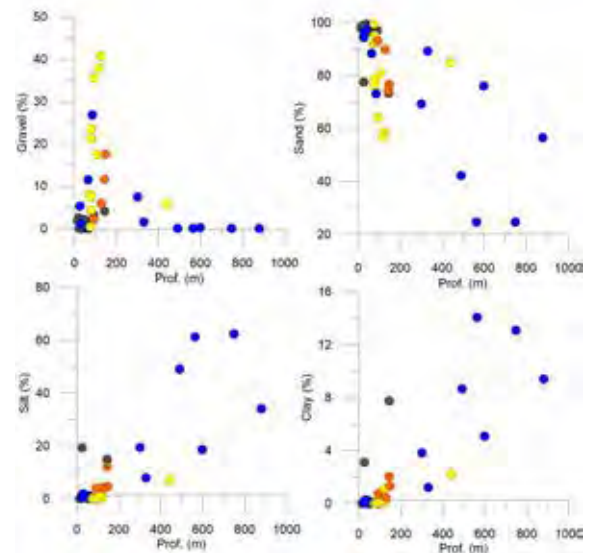


Fig. 6. Sediment types according to textural and depth distribution (type I- grey circles; type II- blue circles, type III— orange circles; type IV- yellow circles).

#### 4. FINAL CONSIDERATIONS

Sediments from the Madeira shelf were classified considering their mineralogical composition and origin. The following classes were identified: terrigenous; mixed siliciclastic–bioclastic sediment; mixed bioclastic-siliciclastic sediment and bioclastic sediment.

In future work other subtypes will be considered, taking into account the textural variability and carbonates percentage. The analyses of the particles characteristics (color, shape) can also be useful for the discrimination of modern *versus* relict deposits.

In relation to the biogenic particles, since their contribution to the identified carbonates, seems also necessary to identify the diversity of organisms present in the sedimentary cover.

The described approach, and sediment classification, will be applied to previously collected samples (2002 and 2007).

#### Acknowledgments

The authors want to thank the precious collaboration of the “pirates” Nunes Santos and Adónis Barata,

Nuno Zacarias, Luis Melo and of the “NRP Auriga” crew in the sediment sampling.

## REFERENCES

- Caldeira, R.M.A., Groom, S., Miller, P., Pilgrim, D. and Nezlin, N.P. (2002). Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 80(2): 336-360.
- Oliveira, A., Santos, A.I., Vitorino, J., and Rodrigues, A. (2007) - Sedimentary particle distribution and dynamics on the Nazaré canyon system and adjacent shelf (Portugal). *Marine Geology*, 246:105-122.
- Instituto Hidrográfico (2003). *Dinâmica Sedimentar da Costa Sul da Ilha da Madeira (Ponta do Pargo ao Cabo Girão)*. REL.TF.GM.02/03, 161pp.
- Instituto Hidrográfico (2007). *Dinâmica Sedimentar da Costa Sul da Ilha da Madeira (Cabo Girão à Ponta de S. Lourenço)*. REL.TF.GM.02/07, 131pp.
- Rodrigues, A., Oliveira, A., Fonseca, R., Taborda, R. and Cascalho, J. (2004). Sedimentary Dynamics of the Southern Shelf of Madeira (Portugal). *Journal of Coastal Research*: 454-458.

# Caracterização geológica e morfológica da plataforma continental entre Sines e a praia de São Torpes

F. Ferreira (1), S. Silva (1), L. Reis (1)

(1) Instituto Hidrográfico, frederico.ferreira@hidrografico.pt

**Resumo:** Esta comunicação pretende contribuir para o conhecimento da plataforma interna entre o Cabo de Sines e a Praia de São Torpes através da análise de perfis de reflexão sísmica de alta resolução, levantamentos de multifeixe, sonar lateral e magnetómetro. Esta zona é composta essencialmente por afloramentos rochosos, fortemente influenciada pelo Complexo Vulcânico de Sines como se pôde verificar pela presença de cerca de 50% do fundo marinho coberto por afloramentos rochosos. Estes afloramentos estão concentrados essencialmente na zona central de estudo, limitados por cobertura sedimentar possante a Oeste do Molho Este (onde atingem 18 m de espessura) e uma cobertura menor a sul da Estação Termoeletrica (cerca de 5 m de espessura). Os dados demonstram ainda a existência de uma elevada rede de fracturação dos afloramentos rochosos, por vezes com preenchimento (filões) e a presença de um paleovale no prolongamento da Ribeira da Junqueira.

**Palavras-chave:** Complexo Vulcânico de Sines, geologia, morfologia, geofísica.

## 1. INTRODUÇÃO

A área em estudo abrange a plataforma adjacente ao porto de Sines, a Sul do Cabo de Sines (Fig 1). Neste promontório, aflora um maciço vulcânico constituído por uma intrusão sub-vulcânica anelar formada por rochas gabro-dioritos e sienitos (Inverno *et al.*, 1993). Este maciço tem orientação E-W, formando um cabo natural, com arribas de altura máxima de 20 m que contactam diretamente com o mar. O cabo de Sines tem efeito de barreira morfológica, provocando a diminuição local dos ventos de N e da agitação marítima dominante de NW-W. A área em estudo devido à implementação e expansão do porto de Sines tem sofrido, desde 1973 até à atualidade, grandes alterações fisiográficas.

O limite da área tem uma configuração irregular, estando limitada a Norte, pela zona de enraizamento do molhe Oeste do porto e, a Sul, pelo término da praia de S. Torpes. Pode-se dividir a área em 2 subsetores: a área NW correspondente ao porto oceânico compreendido entre o molhe Oeste e molhe Este; e a área SE correspondente ao Terminal XXI, que se estende até ao extremo sul da praia de S. Torpes.

### 1.1. Objetivos

Este estudo pretende descrever a plataforma continental na zona de estudo, analisando a morfologia, a cartografia da rocha-sedimento, as espessuras sedimentares e as orientações da fracturação.

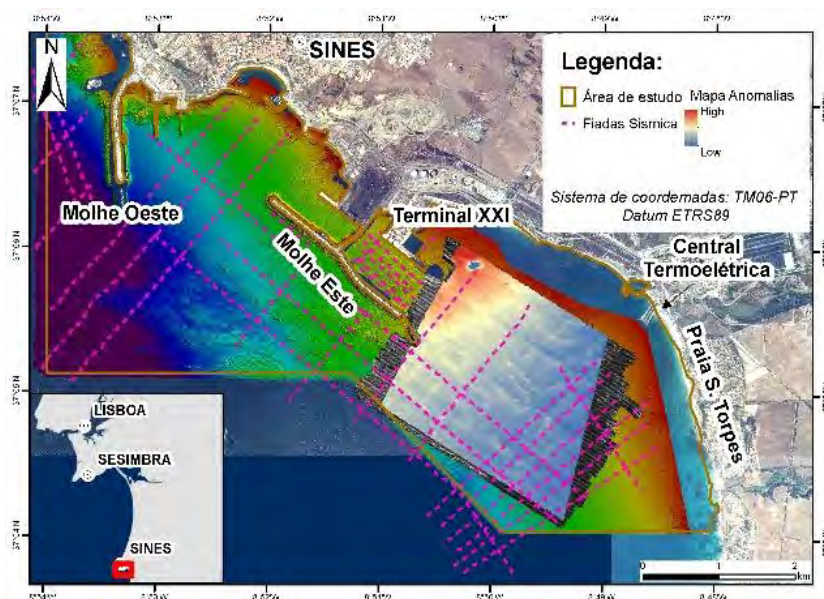


Fig.1. Localização da área em estudo e respetivas áreas de levantamento de reflexão sísmica, SMF na totalidade da área (em tons que vão do vermelho, verde até ao azul escuro, que indicam a variação da menor profundidade para a maior profundidade, respetivamente). Os levantamentos de SSS (em tons de cinzento) e MAG (que indicam a variação das anomalias) foram efetuados no subsetor da área SE.

## 2. METODOLOGIA

A cartografia e a descrição da morfologia da plataforma baseiam-se na análise dos dados obtidos pelos levantamentos com os sistemas sondador multifeixe (SMF), sonar, e reflexão sísmica de alta resolução. Com base nos dados de reflexão sísmica foi construído um mapa de espessuras baseado na diferença em tempo (ms) entre a reflexão do fundo marinho e a reflexão correspondente ao soco acústico. A orientação de fracturação foi obtida através da análise dos dados de SMF, sonar e magnetómetro.

### 2.1. Trabalho de campo

Os trabalhos de campo foram realizados por equipas distintas do Instituto Hidrográfico, de acordo com o tipo de dados adquiridos. O trabalho de campo realizado, resumido na Tabela I, inclui levantamentos hidrográficos e geofísicos (sísmica, sonar e magnetómetro).

O levantamento hidrográfico foi realizado com cobertura total de fundo, entre a linha de costa (sonda mínima de 1.3 m) e os 70.8 m de profundidade (registados no subsector da área NW). O levantamento hidrográfico realizado foi de ordem 1.ª/Tipo I, segundo a publicação S-44 da Organização Hidrográfica Internacional, utilizando um SMF KONGSBERG EM3002 instalado a bordo da UAM “Fisália”. Os dados de sondagem foram reduzidos da altura de maré para o Zero Hidrográfico (ZH), ao marégrafo de Sines.

Tabela I: Síntese do trabalho de campo

Campanha	Data início	Data fim
Levantamento Hidrográfico	07-02-2011	31-03-2011
Levantamento Sísmico	04-04-2011	06-04-2011
Levantamento Magnetometria	19-07-2017	26-07-2017
Levantamento Sonar	27-07-2017	28-07-2017

O levantamento sísmico foi realizado, com um sistema de reflexão sísmica monocal de tipo *Boomer* da Applied Acoustics. A fonte acústica foi montada em catamaran e a fonte de energia utilizada foi uma CSP300. O sistema foi operado com uma energia de 100 Joules e um intervalo entre disparos de 200 ms. A aquisição do sinal foi assegurada com uma cadeia de hidrofones da SIG de 8 elementos, espaçados de 50 cm. A digitalização do sinal foi efetuada com o *software* Delph Seismic ao qual está associada uma carta ADC (*Analogic Digital Converter*) de 16 bits. Este tipo de sistema oferece um bom compromisso entre penetração e resolução vertical (cerca de 40 cm), sendo particularmente indicado quando se pretende alguma penetração em materiais arenosos.

O levantamento de magnetómetro (MAG) consistiu na leitura do campo magnético regional e deteção de eventuais anomalias relacionadas com o substrato geológico desta área, com o sistema magnetómetro SEASPY. O magnetómetro é constituído por um sensor protónico de efeito Overhauser com uma incerteza de 0.01 nT e uma precisão de 0.01 nT.

O levantamento de sonar foi realizado com o sonar de pesquisa lateral KLEIN5000 (SSS), que consiste num sistema de sonar de múltiplos feixes (5 de cada bordo), com focagem dinâmica que permite a obtenção de sonografias de elevada resolução do fundo marinho. O levantamento foi efetuado com um alcance lateral de 75 m, com resolução elevada, a qual permite uma resolução transversal de 7.5 cm e uma resolução longitudinal de 10 cm.

Nos diversos levantamentos o posicionamento dos dados foi assegurado por um sistema *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS).

Os levantamentos hidrográficos e sísmicos englobam a totalidade da área em estudo. Por outro lado, os levantamentos de magnetómetro e de sonar abrangem uma área menor junto ao Terminal XXI do porto de Sines.

### 2.2. Processamento de dados

Os dados adquiridos com o SMF foram processados com o *software* CARIS HIPS v.7.0. Foi efetuado o controlo de qualidade dos dados tendo em consideração a correção e georreferenciação das sondas, a incerteza das medições e exatidão do sistema de posicionamento.

Os perfis de reflexão sísmica foram processados com o *software* IXSEA DELPH SEISMIC INTERPRETATION v2.6. A posição de cada disparo foi corrigida da distância entre o *streamer* e a antena DGNSS, e o eixo das abcissas foi convertido de tempo (ms) em distância (m). De forma a melhorar a razão sinal-ruído do registo sísmico, foram aplicados os seguintes passos de processamento: filtros passa-banda para cortar o ruído fora da largura de banda do sinal, ganhos variáveis no tempo (TVG) de forma a corrigir parcialmente a atenuação do sinal com a distância; filtro de *swell* para corrigir efeitos de estática.

O processamento de dados de magnetómetro foi efetuado recorrendo a rotinas desenvolvidas no *software* MATLAB, descrito em Silva (2013). O processamento consistiu no reposicionamento dos dados e correção da variação espacial do campo magnético terrestre de acordo com o modelo *Enhanced Magnetic Model* 2015.

Os dados adquiridos com o sonar, foram processados com o *software* IXSEA DELPH SONAR INTERPRETATION v4.0, consistindo na aplicação das correções geométricas e radiométricas (TVG, correção de velocidade, remoção da coluna de água, correção da obliquidade considerando o fundo como

sendo plano, correção da distância entre os transdutores e sistema de posicionamento).

### 3. ANÁLISE DE DADOS

#### 3.1. Morfologia

A morfologia da plataforma continental na região de Sines está fortemente influenciada pela instalação do maciço vulcânico de Sines. Os afloramentos rochosos deste maciço são particularmente visíveis em toda a plataforma interna (até aos 30 m de profundidade), desde a raiz do molhe Oeste do porto até aos molhes de descarga da Central Termoeletrica (Fig. 2). Ao longo do Terminal XXI, os afloramentos rochosos prolongam-se pela totalidade da área sondada. As zonas aplanadas, que normalmente estão associadas à existência de uma cobertura sedimentar, ocupam comparativamente com os afloramentos rochosos uma área mais reduzida.

As zonas aplanadas, encontram-se já fora do molhe Oeste do porto de Sines, onde se registam as sondas mais elevadas (superiores a 30 m de profundidade), e na plataforma ao largo da praia de S. Torpes, para sul dos molhes da Central Termoeletrica (Fig. 2).

Os afloramentos rochosos que dominam a plataforma interna e a área portuária contribuem para acentuar a rugosidade existente.

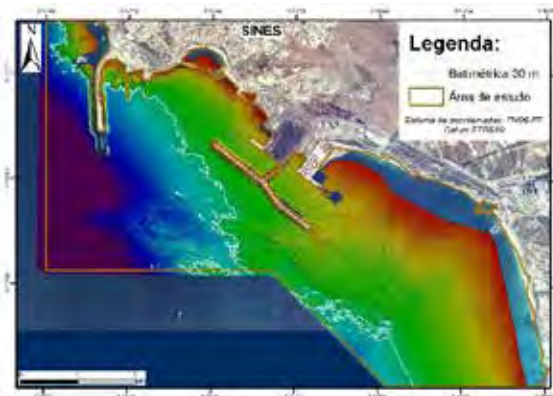


Fig. 2. Morfologia da área em estudo. Afloramentos rochosos (fundo rugoso) que se estendem desde a raiz do molhe Oeste até aos 30 m, dando lugar a partir dessa profundidade a zonas sedimentares (zonas aplanadas).

Relativamente à morfologia da plataforma continental a sul de Sines, observam-se algumas depressões, muito constringidas e condicionadas pelas formações rochosas. Estas depressões podem, por vezes, estar parcialmente cobertas por sedimentos, sendo originadas pela acentuada fracturação. Na zona estudada verifica-se a presença de uma depressão de traçado ligeiramente meandriforme localizada ao largo dos molhes de descarga da Central Termoeletrica, com aproximadamente 3200 m de comprimento. Esta depressão (Fig. 3), apresenta orientação geral NE-SW e encontra-se no prolongamento da Ribeira da Junqueira, sendo espectável que corresponda ao

encaixe do seu antigo vale (paleovale), desenvolvido numa altura em que o nível médio do mar se encontrava a uma cota mais baixa do que a atual.

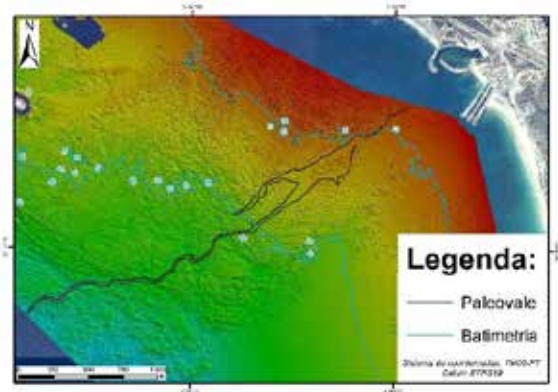


Fig. 3. Área deprimida dos afloramentos rochosos correspondendo ao paleovale da Ribeira da Junqueira.

#### 3.2. Cartografia

A plataforma da zona de estudo encontra-se dividida em duas zonas com características acústicas diferentes, representando realidades geológicas distintas. Uma zona central constituída essencialmente por fundo rochoso, por vezes com pequena cobertura sedimentar das depressões rochosas (de ordem decimétrica), e outra zona constituída por fundo sedimentar com espessuras mais possantes (Fig 4).

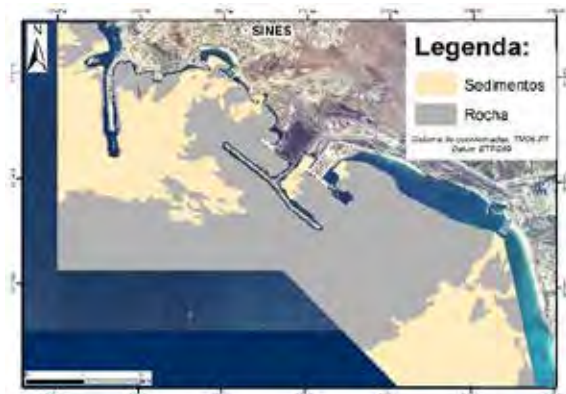


Fig. 4. Cartografia de afloramentos rochosos e sedimentos.

##### 3.2.1. Mapeamento do fundo sedimentar

A bacia sedimentar está dividida em dois setores (Fig 5), o primeiro setor localiza-se na zona ocidental da área, na zona do molhe Oeste, sendo delimitada a leste pelos afloramentos rochosos e a Norte pela zona de enraizamento do molhe, em pleno maciço subvulcânico. As maiores espessuras medidas foram de aproximadamente 17 m, abaixo dos 40 m de profundidade, ao largo do molhe Oeste do porto de Sines. O segundo setor localiza-se no extremo SE da área, em frente à praia de S. Torpes onde, abaixo dos 10 m de profundidade, se encontram espessuras sedimentares da ordem dos 5 m.



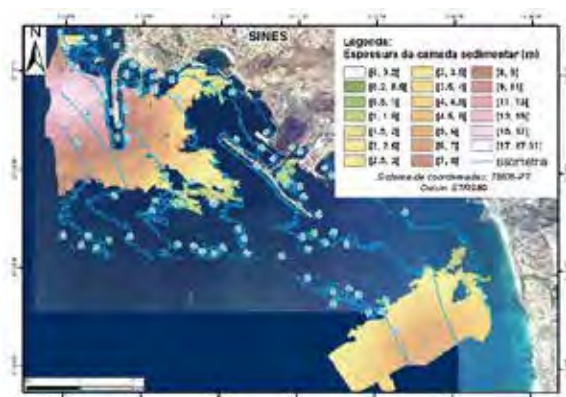


Fig.5. Mapa da espessura sedimentar.

Nas áreas protegidas pelos molhes da estrutura portuária (molhe Oeste e Terminal XII), a cobertura sedimentar é relativamente pouco espessa, estando representada por pequenas bolsadas de sedimentos, protegidas por afloramentos rochosos.

### 3.2.2. Fracturação no fundo rochoso

Na zona rochosa verifica-se uma densa rede de fracturação não sendo observável uma orientação predominante (Fig. 6).

Foi realizado um estudo estatístico de todos os lineamentos detetados com base na informação obtida no SMF, SSS e MAG. Este estudo consistiu na marcação destes lineamentos num SIG (Fig. 6), extração das suas orientações e projeção dos resultados num diagrama de roseta (Fig. 7).

Deste estudo consegue-se verificar que existirá uma maior incidência nas orientações WNW-ESE a NNW-SSE (aproximadamente 45%) e ENE-WSW (aproximadamente 18%).

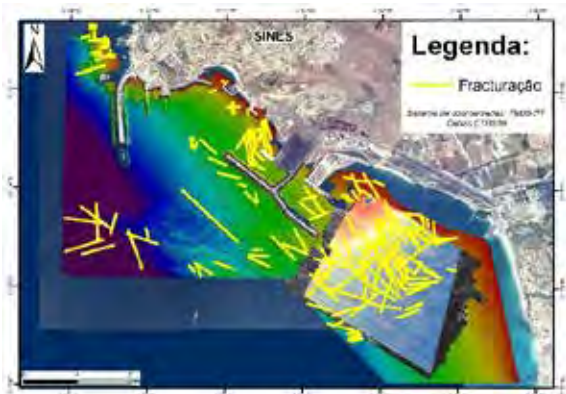


Fig. 6. Rede de fracturação. Tendo por base os dados de SMF, SSS e MAG junto ao terminal XXI.

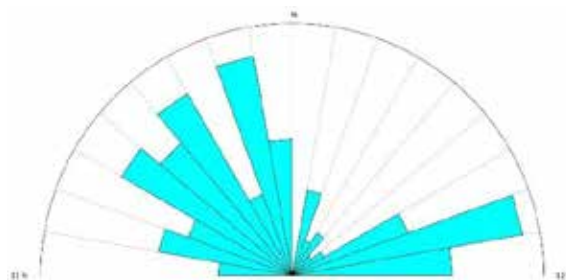


Fig. 7. Orientações da rede de fracturação.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A morfologia da plataforma continental da região de Sines está fortemente influenciada pela instalação do maciço vulcânico de Sines.

Os afloramentos rochosos cobrem essencialmente a zona central da área de estudo. Localizada ao largo da Central Termoelétrica observa-se uma depressão meandriforme, com aproximadamente 3200 m de comprimento, com orientação NE-SW e que se estende desde a foz da Ribeira da Junqueira. É espectável que esta depressão corresponda ao encaixe do seu antigo vale (paleovale), desenvolvido numa altura em que o nível médio do mar se encontrava a uma cota mais baixa do que a atual.

As restantes zonas são cobertas por sedimentos com maior espessura na zona do Molho Oeste (onde chegam a atingir 17 m) e espessuras menores ao largo da praia de S. Torpes (da ordem dos 5 m).

Na zona de fundo rochoso verifica-se uma acentuada rede de fracturação sem que seja visível uma orientação predominante. As direções WNW-ESE a NNW-SSE são as orientações mais comuns (aproximadamente 45%), sendo relevantes também as direções ENE-WSW que correspondem a aproximadamente 18% da rede de fracturação.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os elementos das diferentes equipas técnicas que participaram nos trabalhos de mar e à guarnição da UAM "Fisália".

### REFERÊNCIAS

- Inverno, C.M.C.; Manupella, G.; Zbyzewski, G.; Pais, J.; Ribeiro, M.L. (1993) – Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000 e Notícia Explicativa da Folha 42-C Santiago do Cacém. *Serviços geológicos de Portugal, Lisboa*. 75 pp.
- Silva, S. (2013). *Desenvolvimento de uma metodologia para realização de levantamentos magnéticos marinhos para deteção de objetos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 92pp.

# Efeito da maré em sedimentos silto-argilosos: Estuário do Tejo

R. Santos (1), A. Oliveira (2) e A. I. Santos (2, 3)

- (1) Instituto Hidrográfico/FCUL; ritaguerrasantos93@gmail.com.  
 (2) Instituto Hidrográfico - Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa.  
 (3) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

**Resumo:** Neste trabalho apresenta-se um estudo da variabilidade textural e composicional de sedimentos de fundo colhidos em estação fixa, perto da ribeira do Jamor (estuário do Tejo) durante a campanha SEDEX 2015. Foram realizadas análises granulométricas, do teor de carbono e da mineralogia por difração raios-X da fração silto-argilosa para verificar se existia variabilidade espacial e/ou temporal inter e/ou intramostras. Os resultados mostram que ciclo de maré em estudo não teve uma influência direta nos parâmetros sedimentares analisados, tendo-se observado a existência de variabilidade temporal mais alargada, com estratificação (milimétrica) por vezes encoberta pela atividade biológica.

**Palavras-chave:** Sedimentos, Ciclo de maré, Estuário do Tejo, SEDEX 2015

## 1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é perceber se existe variabilidade espacial e/ou temporal nos sedimentos de fundo, tendo em conta a variação da própria amostragem e perceber se o ciclo de maré teve ou não uma influência direta na composição e textura dos níveis mais superficiais do sedimento. Os sedimentos fluviais provenientes do rio Tejo são maioritariamente arenosos e não alcançam a zona do estuário a jusante de Vila Franca de Xira (Freire, 1999). Os sedimentos marinhos têm uma incursão máxima no estuário que não ultrapassa o canal de embocadura, sendo Belém o limite a montante destas areias. O estudo realizado por Oliveira (1967) através de cortejos de metais pesados mostra que as areias presentes no estuário são mobilizadas pela ação de ondas oceânicas com direção SW/NW. Em síntese, os sedimentos que constituem o fundo do estuário do Tejo consistem numa mistura de material fluvial e derivados marinhos, cuja distribuição reflete a resposta às variações da maré e ao fluxo do próprio estuário (Oliveira, 1967). Neste trabalho teve-se em consideração as taxas de sedimentação determinadas por Silva (2013) que podem variar entre 0,7 cm/ano e 2,2 cm/ano, tendo em conta a extrapolação dos isótopos ( $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$ ).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de sedimentos de fundo foram colhidas durante a campanha SEDEX 2015, realizada a 12 de novembro de 2015 a bordo do navio NRP “Andrómeda”. Nesta campanha, foi ocupada uma estação fixa perto da afluência da ribeira do Jamor (Cruz Quebrada) no baixo estuário do Tejo, durante aproximadamente um ciclo de maré semi-diurna (10 horas). Devido à mudança da direção da corrente de

maré e consequente rotação do navio, as colheitas centraram-se em duas áreas, deslocadas cerca de 150 m (Fig.1).



Fig. 1. Localização dos dois grupos de amostras resultantes da rotação do navio. Grupo I que corresponde à fase de enchente constituído pelas estações #2, #3, #4 e #5 e o grupo II constituído pelas restantes estações na fase de vazante. Ver localização geral em Santos et al. 2018 (this issue).

Os sedimentos foram colhidos com recurso a uma draga Smith-McIntyre, de hora a hora. No interior da draga foram enterrados na vertical três tubos de PVC (76 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento) designados *mini-corers*. Estes permitiram preservar as estruturas sedimentares, a realização de análises geofísicas à posteriori (velocidade das ondas P e suscetibilidade magnética) e o seu registo fotográfico. Ainda a bordo do navio os *mini-corers* foram abertos ao meio e fotografados, tendo-se verificado evidências de bioturbação e estratificação em diversas amostras (Fig. 2).

Os três *mini-corers* colhidos em cada estação de amostragem (30 *mini-corers* no total) foram devidamente identificados e selados para a sua posterior análise em laboratório. Os *mini-corers* designados #2, #3 e #4 são referentes à fase de enchente da maré, os #5 e #6 referentes ao estofo e,

por fim os *mini-corers* entre #7 e #11 são referentes à fase de vazante.

Destes *mini-corers* selecionou-se dois níveis de cada um: um nível superficial (0-2 cm) e o nível imediatamente a seguir (2-4 cm).

Nos níveis selecionados foram realizadas análises granulométricas, ensaios do teor de carbono e matéria orgânica e ensaios de difração raios-X da fração silto-argilosa. Posteriormente, os resultados foram analisados de acordo com os parâmetros Folk & Ward, *Sorting index*, classificação de Flemming (2000), mineralógicos e granulométricos. Para mais detalhes consultar Santos, R. (2017).

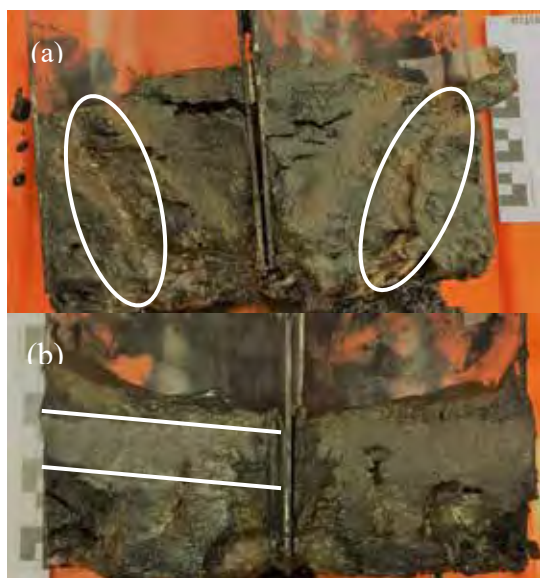


Fig. 2. *Mini-corer* com evidências de bioturbação, representado a branco pela forma oval (a); *Mini-corer* com evidências de estratificação, representado pela linha a cheio branca (b).

### 3. RESULTADOS

Os principais resultados obtidos com a análise textural, matéria orgânica (MO), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), classificação de Flemming e a mineralogia das partículas agrupados em silicatos, filossilicatos e carbonatos encontram-se resumidos na Tabela 1.

Segundo a classificação de Flemming (2000) os sedimentos de ambos os níveis são maioritariamente areias siltosas e siltes arenosos, com teores de finos (silte + argila) superiores a 40%.

De acordo com a Tabela 1 constata-se que, o cascalho é o material minoritário, apresentando valores mais elevados no nível superficial (estações 2 e 9). Estes valores mais elevados (~5%) estão relacionados com a presença de material biogénico (conchas, fragmentos de carapaças de lamelibrânqueos), observados visualmente na colheita.

Quanto às percentagens de areia, silte e argila constatou-se que estas são bastante variáveis, havendo a predominância de areia/silte. A assimetria é bastante variável predominando a assimetria muito positiva (cauda de finos) e aproximadamente simétrica.

Relativamente à percentagem de MO observou-se no nível dos 0-2 cm um valor médio de 3,3 %, enquanto que, no nível dos 2-4 cm foi ligeiramente superior com valor médio de 3,7 %, coincidindo em duas amostras (#2, #9) com o aumento da percentagem da componente silto-argilosa. Por outro lado, a percentagem de  $\text{CaCO}_3$  era mais elevada no nível dos 0-2 cm (valor máximo de 17,5 % e médio de 8,8 %) que sugere uma maior contribuição marinha neste nível. A mineralogia das partículas detríticas dos sedimentos eram maioritariamente silicatos (quartzo, feldspato potássico, plagioclase), seguida dos filossilicatos (clorite, ilite, caulinite) e por carbonatos (calcite e dolomite). A estação #11 (vazante) foi a que apresentou maiores percentagens de filossilicatos.

		Assimetria	% Cascalho	% Areia	% Silte	% Argila	% MO	% $\text{CaCO}_3$	Flemming (2000)	Mineralogia		
										% Filossilicatos	% Silicatos	% Carbonatos
#2	0-2cm	Negativa	5.0	50	32	12	3.0	10.0	areia siltoosa	19	53	28
	2-4cm	Positiva	0.6	52	34	13	3.6	6.7	areia siltoosa	30	57	13
#3	0-2cm	muito negativa	0.8	19	57	24	3.0	5.0	silte argiloso	28	50	22
	2-4cm	muito negativa	0.5	24	55	21	3.2	5.0	silte/areia/argila	45	45	10
#4	0-2cm	Muito Positiva	0.7	57	31	11	3.4	8.3	areia siltoosa	22	57	21
	2-4cm	Muito Positiva	0.3	57	31	13	2.4	6.7	areia siltoosa	28	50	22
#5	0-2cm	Muito Positiva	0.8	50	36	14	3.6	8.3	areia siltoosa	18	60	22
	2-4cm	Muito Positiva	0.2	49	36	15	4.4	5.8	areia siltoosa	38	46	16
#6	0-2cm	Negativa	0.3	18	58	24	2.4	7.5	silte argiloso	22	47	31
	2-4cm	Muito Positiva	0.0	41	44	16	4.0	5.8	silte arenoso	34	42	24
#7	0-2cm	muito negativa	0.9	22	55	22	3.2	17.5	areia/silte/argila	25	49	26
	2-4cm	Aproximadamente simétrica	0.0	24	56	21	5.2	4.2	silte/areia/argila	31	58	11
#8	0-2cm	Aproximadamente simétrica	1.1	34	47	18	3.0	9.2	silte arenoso	21	55	24
	2-4cm	Aproximadamente simétrica	1.9	39	43	17	3.8	9.2	silte arenoso	27	55	18
#9	0-2cm	Negativa a aprox. simétrica	5.7	44	36	14	3.6	7.5	areia siltoosa	33	38	29
	2-4cm	Negativa	0.4	25	53	22	4.2	5.8	silte/areia/argila	25	44	31
#10	0-2cm	Negativa	1.1	25	53	21	4.0	8.3	areia/silte/argila	26	60	14
	2-4cm	Aproximadamente simétrica	0.5	34	48	18	3.0	6.7	silte arenoso	22	48	30
#11	0-2cm	Aproximadamente simétrica	1.7	41	41	16	3.4	6.7	areia siltoosa	50	32	18
	2-4cm	Positiva	0.3	40	43	17	3.2	6.7	silte arenoso	24	57	19

Tabela 1. Variação da assimetria, composição dos sedimentos, classificação de Flemming (2000) e a mineralogia das partículas detríticas que constituem os níveis dos 0-2 cm e dos 2-4 cm para nas amostras colhidas.

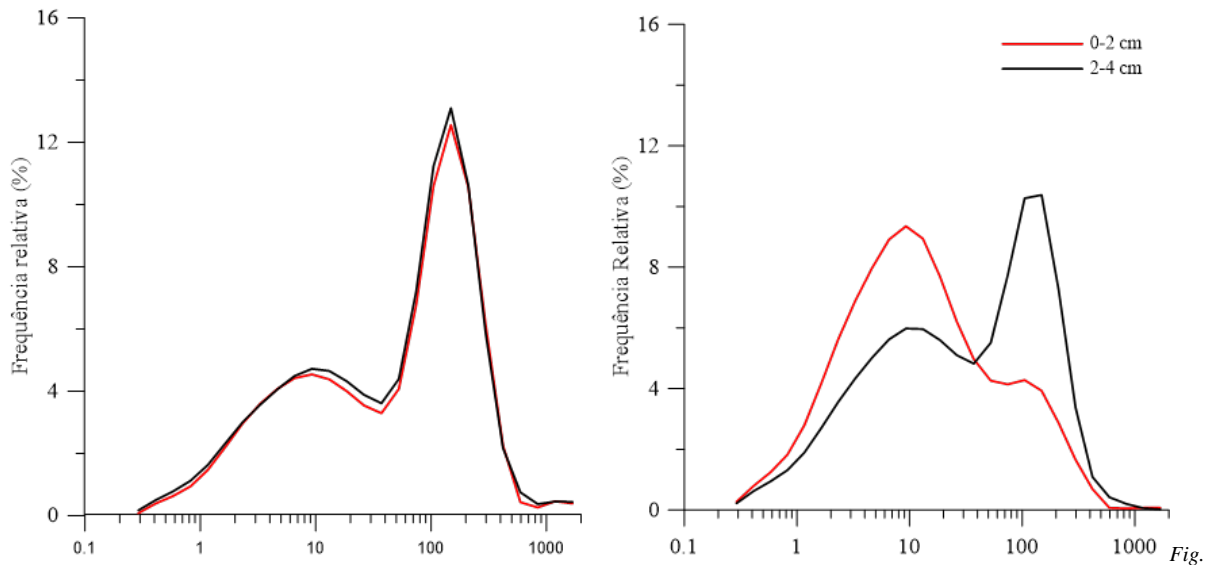


Fig. 3. Moda granulométrica dos níveis 0-2 cm (linha a cheio vermelha) e dos 2-4 cm (linha a cheio preta) de duas das amostras colhidas. À esquerda a amostra #2 bem homogênea e à direita a amostra #9 pouco homogêneo.

#### 4. DISCUSSÃO

Durante o ciclo de maré do ponto de vista textural e composicional não há uma grande variação nas amostras do nível superficial. Porém observou-se que a percentagem de finos (argila + silte) e de filossilicatos é maior na fase de vazante (grupo II), com valores médios de 65% e 31%, respectivamente. A análise das curvas granulométricas mostra um comportamento distinto entre os dois grupos. Nas amostras do grupo I as curvas granulométricas de ambos os níveis estão sobrepostas indicando uma homogeneização dos sedimentos. Pelo contrário as amostras do grupo II (exceto #11) apresentam as curvas granulométricas diferenciadas, sendo as duas modas principais diferentes sugerindo a existência de estratificação.

A maior ou menor homogeneização poderá estar relacionada com: o efeito da bioturbação (Fig.2); a variação das condições hidrodinâmicas no local (nomeadamente ao forçamento de vido à corrente de maré); com a influência das descargas da ribeira do Jamor. Contudo, como o local de amostragem é distinto (separados de cerca de 150 m), esta variação pode não dever-se ao efeito da maré, mas sim à variação espacial da distribuição dos depósitos sedimentares, revelando a influência de fatores forçadores de maior escala temporal (eventos de tempestade, com o conseqüente aumento do caudal do rio e maior amplitude das marés). Isto é reforçado pelas taxas de sedimentação determinadas por Silva (2013) que indicam que a camada dos 0-4 cm poderá ser o resultado de 2 anos (2,2 cm/ano) a 6 anos (0,7 cm/ano) de sedimentação.

#### 5. CONCLUSÃO

As amostras que constituem o fundo perto da ribeira do Jamor são maioritariamente areia e silte. Estas partículas são constituídas por silicatos, filossilicatos e carbonatos. A percentagem de  $\text{CaCO}_3$  sugeriu a existência de uma maior contribuição marinha no nível superficial. A análise granulométrica de ambos os níveis mostrou que o ciclo de maré em estudo não teve uma influência direta na camada dos 0-2 cm. A análise textural e da curva granulométrica sugere uma diferenciação entre os dois grupos de amostras analisados. Contudo, tendo em conta a ação da bioturbação observada nas amostras e as taxas de sedimentação não foi possível perceber se existe variabilidade espacial, temporal ou mesmo ambas.

No futuro, para estudar o efeito da maré nos sedimentos de fundo e tendo em conta a variabilidade textural e a bioturbação natural dos depósitos estuarinos, é necessário garantir um bom posicionamento (<1m). Critérios muito difíceis de conseguir em ambiente natural. A análise milimétrica seria também aconselhável tendo em conta as taxas de sedimentação determinadas para o local.

#### Agradecimentos

Agradece-se à tripulação da Marinha que esteve a bordo do NRP “Andrômeda” e permitiu que estes dados fossem colhidos durante a campanha SEDEX 2015 do IH.

## REFERÊNCIAS

- Flemming, B. W. (2000). *A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis ternary diagrams. Continental Shelf Research*, 20, 1125-1137.
- Freire, P (1999). Evolução Morfo-sedimentar de margens estuarinas (Estuário do Tejo, Portugal). Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Oliveira, R. (1967). Contribuição para o estuário do Tejo. Sedimentologia. Memória LNEC n°296. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. 61.
- Santos, R. (2017). Dinâmica num sector distal do Estuário do Tejo com base em dados oceanográficos, sedimentológicos e de nanoplâncton calcário. Tese de mestrado em Ciências do Mar. Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Santos, R. Santos, A. I. e Oliveira, A. (2018). Variabilidade textural e composicional das partículas em suspensão durante um ciclo de maré- Estuário do Tejo (*submetido às 5JEH*).
- Silva, T. (2013). Sedimentologia e morfodinâmica de sapais do estuário do Tejo em cenários de alteração climática. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa.

## Resultados preliminares do mapeamento de anomalias magnéticas na plataforma da Ilha de Santa Maria (Açores)

S. Silva (1), P.F. Silva (2,3), R. Quartau (1), A. Vinhas (1) e R. Ramalho (2)

- (1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas n° 49 1249-093 Lisboa. [sandra.silva@hidrografico.pt](mailto:sandra.silva@hidrografico.pt)  
 (2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa  
 (3) IPL, ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Física, 1959-007 Lisboa

**Resumo:** No âmbito do projeto PLATMAR adquiriram-se dados de batimetria multifeixe, perfis de reflexão sísmica de alta resolução e dados de magnetómetro, na plataforma da ilha de Santa Maria, no Arquipélago dos Açores.

Os dados magnéticos permitiram realizar um mapa de anomalias magnéticas da plataforma de Santa Maria, as quais resultam da alternância do campo magnético terrestre entre períodos de polaridade normal e inversa. Os dados aqui adquiridos são interpretados sob esta perspetiva. As formações com polaridades negativas encontram-se na zona sul, sudoeste e nordeste da plataforma e as formações com polaridades positivas encontram-se na zona este e noroeste. São de realçar as interrupções abruptas, a oeste da zona norte e a sul da zona leste, que colocam materiais com diferente polaridade em contato. Estes resultados preliminares permitem obter um maior conhecimento da estrutura do edifício vulcânico, que de uma forma geral é congruente com a história geológica conhecida desta ilha. No entanto são propostos novos levantamentos em terra de modo a esclarecer algumas questões.

**Palavras-chave:** PLATMAR, magnetómetro, processamento, anomalias magnéticas.

### 1. INTRODUÇÃO

O projeto PLATMAR (*Evolução de PLATAformas insulares vulcânicas: A ilha de Sta. MARIA e implicações para avaliação de riscos, cartografia de habitats e gestão de agregados marinhos*), financiado pela FCT, pretende caracterizar a natureza e morfologia do fundo da plataforma e talude superiores da ilha de Santa Maria para complementar o conhecimento existente sobre a evolução geológica da ilha. A primeira campanha foi realizada a bordo do N/I *Arquipélago* entre agosto e setembro de 2016. Nesta campanha adquiriram-se dados de batimetria multifeixe e de retrodispersão acústica, perfis de reflexão sísmica de alta resolução e levantamento magnético na plataforma da ilha de Santa Maria.

As anomalias magnéticas registadas em contextos vulcânicos resultam essencialmente da alternância do campo magnético terrestre entre períodos de polaridade normal e inversa. Assim, a cartografia destas anomalias contribui com novas perceções sobre evolução espaço/temporal de edifícios vulcânicos (Miranda *et al.*, 1991; Quartau *et al.*, 2015). Este registo é a base da presente comunicação, onde se descreve a aquisição e o processamento dos dados magnéticos adquiridos com o objetivo de contribuir para um melhor conhecimento da evolução geológica da ilha Santa Maria.

### 2. TRABALHO DE CAMPO

O levantamento magnético foi realizado com o sistema magnetómetro SEASPY da MARINE MAGNETICS™, constituído por um sensor de precessão protónica de efeito *Overhauser*, que permite a medição do campo magnético local com uma resolução de 0.01 nT.

O sistema foi rebocado a ré da embarcação, a uma distância de cerca de 200 m, através de um cabo leve de modo a garantir o afastamento necessário do magnetómetro da influência magnética da embarcação. O posicionamento do equipamento foi efetuado através de DGNS (Differential Global Navigation Satellite System) e conhecimento do comprimento de cabo.

O levantamento foi realizado, sempre que possível, junto à superfície, controlado permanentemente pelo altímetro e sensor de pressão incorporado no sistema, a uma taxa de amostragem de 1 Hz. No total, o levantamento magnético contemplou 122 fiadas ao longo da plataforma da ilha de Santa Maria (Fig. 1).

Os dados foram adquiridos com recurso ao *software* SEALINK, da MARINE MAGNETICS™, e gravados em formato ASCII.

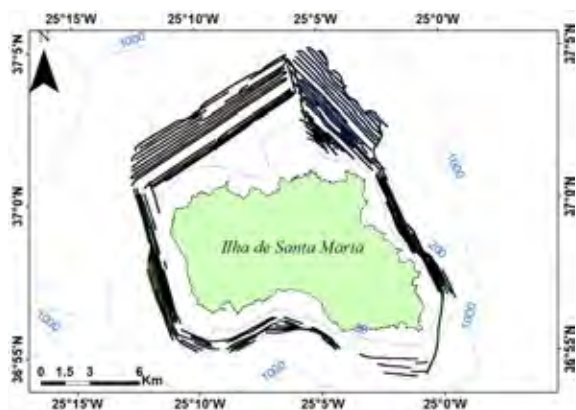


Fig. 1. Localizações das fiadas (a negro) do levantamento de magnetómetro na plataforma da Ilha de Santa Maria. As linhas a azul claro correspondem às curvas batimétricas dos 30 m, 200 m e 1000 m. (coordenadas geográficas, datum WGS84).

### 3. PROCESSAMENTO

O processamento dos dados do magnetómetro foi iniciado com o reposicionamento e correção em relação à posição da embarcação, e a subtração do campo magnético principal de acordo com o modelo IGRF 12 (12th Generation International Geomagnetic Reference Field; Thébault *et al.*, 2015). Este primeiro passo foi realizado recorrendo a rotinas desenvolvidas em MATLAB, da MATHWORKS™.

Posteriormente foram produzidos dois mapas: Anomalias Magnéticas reduzidas ao Pólo e Magnetização. Estes mapas foram obtidos utilizando: ARCGIS da ESRI™, que é um sistema de informação geográfica e que permitiu a aplicação de técnicas de interpolação aos dados de magnetómetro e de batimetria; e MIRONE, uma plataforma de interface para manipulação de grelhas GMT (Generic Mapping Tools), escrita em MATLAB (Luís, 2007), que permitiu realizar técnicas de processamento de dados magnéticos, nomeadamente o de inversão de dados.

Para a realização do mapa de magnetizações, através do método de inversão de Parker (Parker and Huestis, 1974), foi considerada uma espessura constante da fonte de anomalia de 500 m e um filtro passa banda de 0.5 a 150 km de forma a assegurar a convergência.

### 4. RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

A distribuição espacial das anomalias magnéticas e da magnetização calculada permite numa primeira abordagem a identificação de 3 zonas principais (Fig. 2): Zona norte (ZN), Zona sul e oeste (ZSW) e Zona este da plataforma da ilha (ZE).

A anomalia magnética da ZSW é maioritariamente negativa, onde a sul atinge o máximo de toda a área de levantamento. A ZE é essencialmente positiva com exceção uma pequena zona mais a sul ligeiramente

negativa. A ZN é uma zona com diversas anomalias, destacando-se duas áreas. Uma área mais a oeste positiva com uma pequena área onde predomina uma anomalia ligeiramente negativa bem delimitada com uma orientação geral NNW-SSE. A área mais a este da ZN é basicamente negativa com pequenas anomalias positivas bem delimitadas.

De acordo com os trabalhos de Ramalho *et al.* (2017) e de Stortvedt *et al.* (1989), as unidades mais antigas, Formação dos Cabrestantes, Complexo Vulcânico dos Anjos e Complexo Vulcano-sedimentar do Touril, estão datadas de 6 a 4.8 Ma. Este período temporal, final do Miocénico e início do Pliocénico, coincide com uma época de polaridade maioritariamente negativa. De acordo com a escala de polaridades geomagnéticas (Pitman e Heirtzler, 1966), corresponderá à época Gilbert. Os mesmos trabalhos mencionados anteriormente referem que as unidades mais recentes, Complexo Vulcânico do Pico Alto e Formação de Feteiras, são datados de 4 a 2.9 Ma. Estas idades coincidem com uma época, entre os 3.5 a 2.5 Ma designada por época Gauss, de polaridade maioritariamente positiva.

O mapa de magnetização permite, através da magnitude e sentido da magnetização determinada, inferir a profundidade relativa da fonte de magnetização e a respetiva polaridade. De seguida faz-se um resumo da análise deste mapa centrado nas zonas atrás mencionadas.

A ZN pode ser subdividida em duas subzonas:

(1) Uma subzona W com uma forte magnetização positiva, na ordem dos 2.5 a 3.7 A/m<sup>2</sup>, e com uma pequena magnetização negativa bem delimitada cuja magnitude relativamente baixa, na ordem dos -2 A/m<sup>2</sup>, permite inferir que o material se encontra subafiorante. A passagem entre os materiais com magnetizações positiva e negativa é abrupta (Fig. 2). A interpretação dos dados de sísmica, adquiridos na mesma campanha, permite ver uma interrupção da continuidade dos refletores, que coincide com os limites da anomalia magnética negativa (Fig. 3). O movimento sugerido pelo rejeito dos refletores permite-nos definir uma estrutura em graben. Na mesma zona é visível no modelo digital do terreno, obtido através de dados de multifeixe, uma estrutura bem delimitada por três lineamentos bem visíveis (ver Fig. 4). Estes lineamentos correspondem a falhas cujo rejeito aparente é visível em terra (Ramalho *et al.* 2017). Esta movimentação relativa colocou assim materiais com assinatura ligeiramente negativa (logo de idades distintas, no interior do graben), adjacentes a formações com anomalia positiva. Esta anomalia está de acordo com a movimentação relativa inferida através de parâmetros geomorfológicos, reconhecidos na batimetria e perfis de sísmica de reflexão (Figs. 3 e 4).

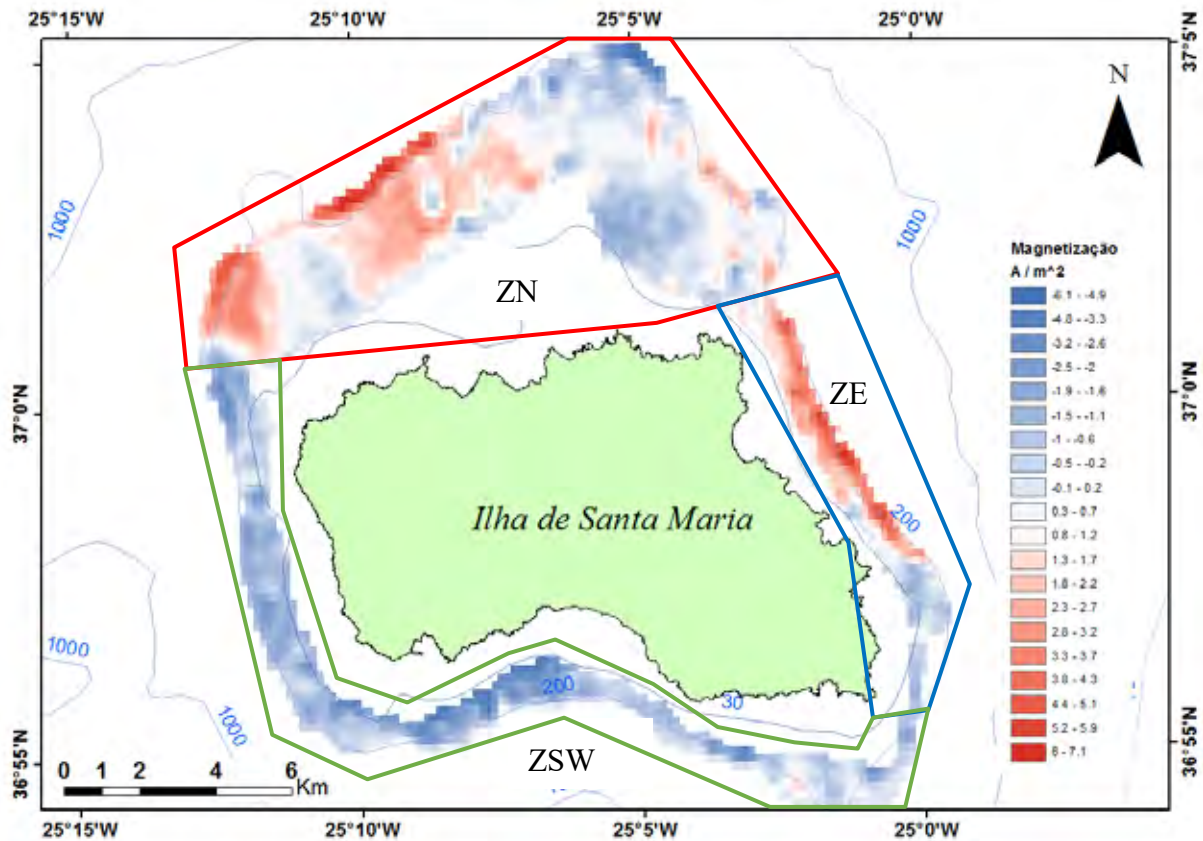


Fig. 2. Mapa de magnetização com a delimitação das principais zonas (coordenadas geográficas, datum WGS84).

(2) Uma subzona E, onde a magnetização é essencialmente negativa até um máximo de  $-2 \text{ A/m}^2$ , porém com pequenas magnetizações positivas que coincidem maioritariamente com estruturas cónicas vulcânicas visíveis nos dados de multifeixe.

Na ZSW, que cobre todo o setor sul e ocidental da ilha, verificam-se os valores mais baixos de magnetização, cerca de  $-3 \text{ A/m}^2$ , observando-se ainda pequenas zonas com magnetizações positivas até um máximo de  $1.6 \text{ A/m}^2$  (Fig. 2).

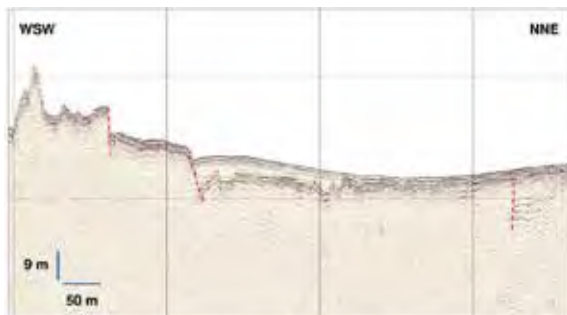


Fig. 3. Perfil de sismica com marcação dos principais lineamentos (tracejado a vermelho).

A ZE, é predominantemente positiva com valores a rondar os  $3 \text{ A/m}^2$ . As pequenas áreas de magnetizações negativas estão localizadas na zona

SE da ilha e apresentam valores até um mínimo de  $-1.42 \text{ A/m}^2$  (Fig. 2). A magnetização positiva terá ocorrido numa altura em que o CMT encontrava-se com polaridade normal, e mais uma vez a sua magnitude leva a querer que este material aflora ao longo deste troço.

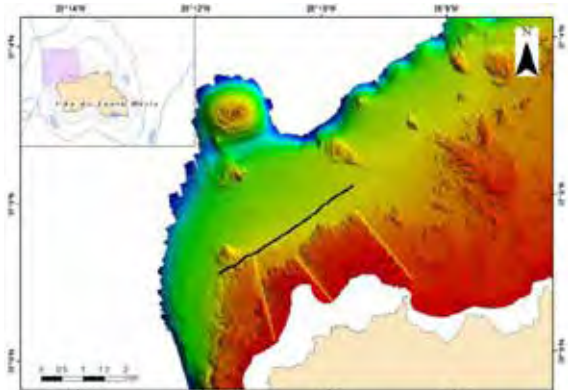


Fig. 4. Localização do perfil de sismica (traço a negro) no modelo digital do terreno obtido com os dados de multifeixe, onde são visíveis lineamentos (tracejado a amarelo) que coincidem, em direção, com os lineamentos marcados no perfil de sismica (coordenadas geográficas, datum WGS84).

A passagem, a sul da zona, entre os materiais com magnetizações negativas e positivas, descritas anteriormente, é abrupta. Esta passagem tem também evidências morfológicas, que embora sem se poder dizer o movimento relativo entre as formações



rochosas envolvidas e a profundidade das mesmas, faz com que materiais com diferentes sinais de magnetização estejam em contacto direto. Esta anomalia em particular é de difícil interpretação, pois nem a morfologia da plataforma ou a estrutura geológica aflorante ao longo da arrija adjacente o justificam. Uma possibilidade para explicar esta anomalia será a ocorrência de uma inversão de polaridade durante o avanço, prolongado no tempo, dos depósitos de lava do Pico Alto, que expandiram a linha de costa neste troço para leste ao longo de 1–2 milhões de anos. Outra possibilidade estaria relacionada com o facto deste troço de costa ser controlado, pelo menos parcialmente, por falhas perpendiculares à linha de costa com movimentação predominantemente vertical, que terão contribuído para colocar lado a lado materiais com polaridade distintas.

## 5. CONCLUSÕES

A interpretação dos produtos finais do processamento dos dados magnéticos, permite concluir, que as formações com polaridades negativas encontram-se na ZE sub zona sul, e na ZN sub zona este, e que formações com polaridades positivas encontram-se na ZE e na ZN sub zona oeste.

Porém, tendo em conta a evolução geológica e paleomagnética conhecida da ilha, e já referenciada anteriormente, seria de se esperar que todo o bordo da plataforma norte desta ilha fosse formado por material mais antigo (i.e., com magnetização negativa). A plataforma a norte da ilha, aplanada e de grande extensão, cerca de 8 km, evidencia uma superfície que teve bastante tempo a ser erodida, logo será formada por materiais contemporâneos à Formação dos Cabrestantes ou mais antigas. A presença de material com magnetização positiva na ZN poderá então ser justificada com material anterior à época de Gilbert em que o CMT teria uma polaridade normal.

A magnetização positiva na ZE poderá ser justificada com a progradação do Complexo Vulcânico do Pico Alto. Todas as restantes magnetizações negativas corresponderão a materiais provenientes das unidades mais antigas, Formação dos Cabrestantes, Complexo Vulcânico dos Anjos e Complexo Vulcano-sedimentar do Touril.

As anomalias bem delimitadas por estruturas tectónicas que põem lado a lado magnetizações opostas poderão ser a expressão de acidentes ocorridos em maior profundidade relacionados eventualmente com a fase de *uplift* da ilha, como sugerido por Ramalho *et al.* (2017).

Embora preliminares, a integração de dados batimétricos, sísmicos e magnéticos, permite ter uma melhor visão geral sobre a evolução vulcano-tectónica da ilha de Santa Maria, embora com algumas questões ainda por responder.

Como trabalhos futuros pretende-se, no âmbito do projeto PLATMAR, realizar um levantamento magnético em terra de forma a obter-se uma melhor amostragem e consequentemente uma melhor interpolação dos dados, numa malha o mais regular possível. Desta forma poder-se-á inferir a polaridade das formações dado que a informação paleomagnética existente é muito limitada.

## Agradecimentos

A aquisição da batimetria multifeixe, perfis de reflexão sísmica de alta resolução e dados de magnetómetro foi financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto PLATMAR (PTDC/GEO-GEO/0051/2014).

## REFERÊNCIAS

- Luis, J. F. (2007). Mirone: A multi-purpose tool for exploring grid data. *Computer & GeoScience*, 33., p. 31-41.
- Miranda, M., Luis, J.F., Abreu, I., Victor, L.A., Galdeano, A., Rossignol, J.C. (1991). Tectonic framework of the Azores Triple Junction. *Geophys. Res. Lett.* 18, 1421–1424.
- Parker, R.L., Huestis, S.P. (1974). The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography. *J. Geophys. Res.* 79, 1587-1593.
- Pitman W. C. e Heirtzler, J. R. (1966) Magnetic Anomalies over the Pacific-Antarctic Ridge. *Science*, Vol. 154, p. 1164-1171
- Quartau, R., Madeira, J., Mitchell, N.C., Tempera, F., Silva, P.F., Brandão, F. (2015) The insular shelves of the Faial-Pico Ridge (Azores archipelago): a morphological record of its evolution. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 16 (5):1401–1420. <https://doi.org/10.1002/2015GC005733>.
- Ramalho, R. S., Hellfrich G., Madeira, J., Cosca M., Thomas C., Quartau, R., Hipólito A., Rovere A., Hearty P. J. and Ávila, S. P. (2017) Emergence and Evolution of Santa Maria Island (Azores) – The conundrum of uplifted islands revisited. *The Geological Society of America*, 129(3/4), p. 372-391.
- Storetvedt, K. M., Serralheiro A., Moreira, M. e Abranches M. C. (1989) Magnetic Structure and Evolution of the Island of Santa Maria, Azores. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 58, p. 228-238.
- Thébault E., Finaly C.C. and Toh H. (2015) International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth Planets Space* 67:79. doi:10.1186/s40623-015-0228-9

# Mineralogy and geochemistry of Lucky Strike hydrothermal rocks, 37°N on the Mid-Atlantic Ridge

P.L. Ferreira (1), C. Inverno (1), A. Pinto (2), F. Guimarães (1), R. Calvo (1) and J.H. Monteiro (3)

- (1) Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) - Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, Apartado 7586 Alfragide, 2610-999 Amadora, Portugal. Email address: Pedro.Ferreira@lneg.pt
- (2) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) - Campo Grande 016, 1749-016 Lisboa, Portugal
- (3) Sociedade Portuguesa de Ciências Naturais (SPCN) - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa Campo Grande 016, 1749-016 Lisboa, Portugal

**Abstract:** The Lucky Strike hydrothermal field is located in the Azores region within the Mid-Atlantic Ridge (37°N). It is composed by many active vents and hydrothermal deposits. In this work we will characterize the mineralogy and geochemistry of the distinct hydrothermal rocks that were subdivided into three groups: 1) Cu-rich and Ba+Zn-rich chimney fragments, having their original shape preserved; 2) Massive sulphides, without any preserved structure, that could correspond to disaggregated ancient chimney structures or, alternatively, derived from deposits that were exposed, and later eroded, by tectonic movements, which are common in this type of geotectonic environment; 3) Volcanic rocks (pillow lavas and hyaloclastite deposits) which were subject to variable degrees of hydrothermal alteration. The various types of hydrothermal rocks and their extensive spatial distribution (~1 km<sup>2</sup>) support the existence of a long series of discrete hydrothermal vents, each one having the possibility to create, modify and incorporate distinct sulfide bodies.

**Key words:** Hydrothermal alteration, Polymetallic massive sulphide, Mineralogy and geochemistry, Mid-Atlantic Ridge, Lucky Strike vent field

## 1. INTRODUCTION

The Lucky Strike hydrothermal field was discovered in 1992 during dredging operations at 37°17' N, on the Mid-Atlantic Ridge (MAR), in the FAZAR cruise (Langmuir *et al.*, 1997). Since then, this area has been extensively studied (Escartin *et al.*, 2015), but the number of published chemical data from the hydrothermal rocks and polymetallic massive sulphides associated to the Lucky Strike vent field remains small. Two oceanographic cruises organized by the Marine Geology Department, of the Geological and Mining Institute of Portugal (IGM), in the framework of Project INGMAR (FCT), were carried out in co-operation with UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission in 2000 and 2002, allowing to sample the rocks of the seafloor encompassing the hydrothermal field area (Murton *et al.*, 2000; Ferreira *et al.*, 2000). In this work we will present the main chemical and mineralogical composition of the volcanic and hydrothermal rocks as well as from the polymetallic massive sulphides collected during these cruises.

## 2. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE LUCKY STRIKE SEGMENT

The Lucky Strike segment (PO-1) of the slow-spreading MAR is located between 37°00' N and 37°35'N, has a total length of ~65 km long and is

bounded by two second-order non-transform discontinuities (Fig. 1a). Bathymetry and sidescan sonar imagery reveal a segment that has a large composite volcanic plateau at its centre (e.g. Langmuir *et al.*, 1997). The segment is also characterized by a typical morphology of a slow-spreading centre having a well-developed rift valley, with straight and subparallel axial valley walls, characterised by large fault throws of up to 1000 m (Fig.1b). The central topographic high is made up of a composite volcano that is 13 km long, 7 km wide rising from a mean basal depth of 2200 m, and is divided into two parts separated by a N-S valley. The existence of a lava lake at the central part of the depression, among the three summit cones, was first discovered during the DIVA1 cruise (Fouquet *et al.*, 1995). The lava lake has a circular shape and is about 300 m in diameter and up to 6 m deep, at a water depth between 1730 and 1736 m. Very fresh lavas, with low vesicularity, are present on the bottom of the lake contrasting with most lavas from the three volcanic cones which are composed of older, highly vesicular, volcanic breccia. The central topographic high hosts a vigorous hydrothermal system where the active vents are located around the lava lake (Fig. 1c). The active vents are distributed over a wide area at a shallow depth (1630-1730 m), and hydrothermal activity appears to be episodic (e.g. Humphries *et al.*, 2002) and distributed around the lava lake. Hydrothermal discharges occur as high

temperature black smokers (which can reach temperatures of  $\sim 325^{\circ}\text{C}$ ) with anhydrite flange structures rich in barite and iron-zinc sulphides, or alternatively as low temperature diffuse flows with deposition of amorphous silica (e.g. Langmuir *et al.*, 1997; Von Damm *et al.*, 1998). The most active part is on the eastern side of the lava lake. This is one of the most extensive hydrothermal fields discovered to date (e.g. Escartin, 2015).

suffered the effects of low-temperature seawater alteration and other show variable chemical compositions related to the degree of hydrothermal alteration (including the hydrothermal breccias). The epitome of the hydrothermalism in the Lucky Strike segment is given by the significant presence of active vents made by high temperature black smokers, rich in Cu, and by Ba-Zn rich low temperature white smokers. Their disaggregation and accumulation on the sea bottom formed a deposit of sulphide rubble.

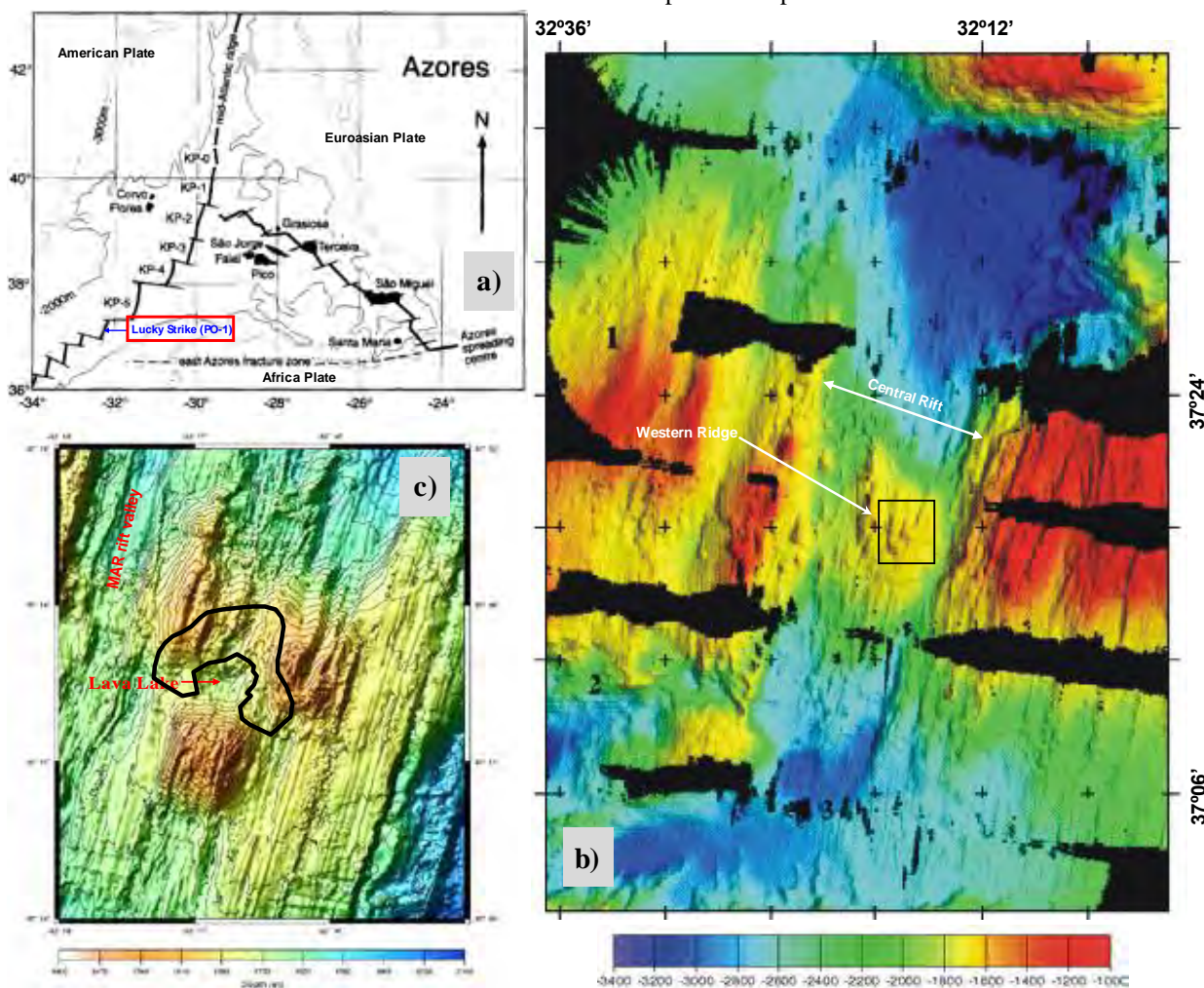


Fig.1. a) Location of the Lucky Strike Segment (PO-1) in the context of the Mid-Atlantic Ridge – Azores Platform region. b) Bathymetry map of the Lucky Strike Segment obtained during the Flores cruise (Bogault *et al.*, 1997). c) Detailed bathymetry map (DSL-120 phase bathymetry) of the eastern part of the composite Lucky Strike volcano (square area defined in b)), composed by three volcanic cones at its summit surrounding the lava lake (adapted from Humphries *et al.*, 2002). Irregular-shape black line outlines approximately the hydrothermal area.

### 3. MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE LUCKY STRIKE SEAFLOOR ROCKS

The central area of the Lucky Strike volcano is made by distinct volcanic and hydrothermal rocks having specific geochemical characteristics. The volcanic rocks are separated into two groups: the basalts of the lava lake, almost aphyric and exhibiting low vesicularity; and the highly vesicular and plagioclase aphyric basalts that constitute the three volcanic summit cones. Some of these volcanic rocks have

#### 3.1. Unaltered volcanic rocks

The lava lake volcanic rocks have tholeiitic compositions and in the total alkalis silica diagram (TAS diagram, compositional fields from Le Bas *et al.*, 1986) are classified as basalts. They present a limited major chemical composition with average values of MgO (7.90 wt%), TiO<sub>2</sub> (1.06 wt%), CaO (12.10 wt%) and O<sub>3</sub>(T) (10.90 wt%), all identical to those presented by basalts generated in the Mid-Ocean Ridges. Taking into account the incompatible

trace element abundances, and some ratios involving these elements, the lava lake basalts correspond to typical enriched MORB (E-MORB). Several more-to-less incompatible element ratios (involving the HFSE, LILE and REE element groups), normalized to primitive mantle composition (Sun & MacDonough, 1989), always present average values higher than unit (e.g. La/Sm = 1.5; Nb/Zr = 2.2; Ba/Y = 1.6; Rb/Yb = 1.7), emphasizing the enriched character of these lavas. The highly vesicular lavas of the three summit cones also correspond to tholeiitic basalts, but present a higher range of chemical variation and are more differentiated: MgO (5.25 – 7.88 wt%); TiO<sub>2</sub> (0.80 – 1.21 wt%); CaO (12.02 – 15.37 wt%); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(T) (4.98 – 7.35 wt%). These basalts have higher incompatible element concentrations, and the more-to-less incompatible element ratios are significantly higher than those presented by the lava lake basalts (the primer with primitive mantle normalized ratios: La/Sm = 3.3 – 3.5; Nb/Zr = 5.4 – 5.8; Ba/Y = 8.4 – 11.4; Rb/Yb = 51 – 7.9). These basalts have a degree of enrichment between those of E-MORB and OIB. Plagioclase is the ubiquitous phenocryst, but olivine phenocrysts may be sparsely identified as well.

### 3.2. Volcanic rocks showing low temperature seawater alteration effects

The low temperature seawater alteration effects are recognized in a few of the basalts from the summit cones (the lava lake samples are very fresh, having a developed outer rim composed by fresh volcanic glass). Through specific relationships involving major and trace elements, five elements were identified as being likely affected by secondary alteration, which has modified their primary magmatic concentrations: Rb, K, Ba, U and Pb. Both Rb and K present considerable scatter in their abundances. When these elements are plotted against immobile elements with identical incompatible degree, an alkalis loss is recognized. Three basalts show clearly higher Ba concentrations (611 – 2760 ppm), but more subtle increments are identified when Ba/Yb is plotted against Nb/Yb. Hence, secondary alteration provides a gain relative to the primary magmatic Ba concentrations. The effects of secondary alteration on basalts are also expressed by the increase in their U and Pb concentrations, which may be up to 4 and 10 times higher, respectively, compared to their magmatic concentrations. Fig. 2 summarizes these element fluxes attributed to low temperature seawater alteration effects.

### 3.3. Hydrothermal altered rocks

This group of rocks is composed by a variety of seafloor volcanics (either lavas or hyaloclastite deposits) having distinct hydrothermal alteration degrees that allowed the identification of a continuous geochemical evolution trend linking the unaltered volcanic rocks and the rocks possessing the highest degrees of alteration, such as the

hydrothermal breccias and silicified and mineralized rocks. With increasing hydrothermal alteration, a general and progressive increase in Ba and Cu (reaching 0.6 and 0.4 wt%, respectively) is identified. The samples show more variable element concentrations, but when considering the major oxides Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(T) and MnO their contents are always higher (up to 17 and 11 wt%, respectively) than their corresponding average magmatic values. Occasionally, Mo can reach up to 300 times their primary magmatic concentrations (~400 ppm). From the transition metals Co, V and Cr, only the last shows a significant increase (5x) when compared to their primary magmatic concentrations. A particular rock type, with massive aspect, aphyric texture, scattered pyrite crystals, leucocratic in colour and rich in silica (61 wt%), Ba (6000 ppm) and Cu (7000 ppm) complement the variably hydrothermally altered rock assemblage of the Lucky Strike field.

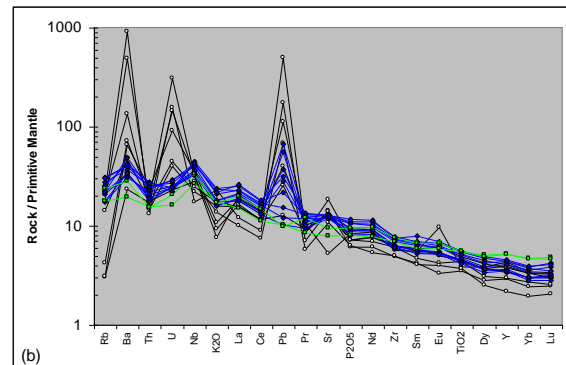


Fig.2. Primitive mantle normalized (Sun and MacDonough, 1989) concentrations for the most altered basalts (white circles/black lines). For comparison the freshest basalts collected in the three volcanic cones (blue and green lines).

### 3.4. Polymetallic massive sulphides

Polymetallic massive sulphides were collected in 10 distinct sampling sites of the Lucky Strike hydrothermal field. These samples correspond to fragments of hydrothermal chimneys (having an internal structure and / or preserved original shape) (Fig. 3a) and to sulphide rubble (massive texture lacking any internal organization). Two types of chimney fragments were recognized: 1) Cu-rich chimneys and 2) Zn+Ba- rich chimneys. The primer group has a typical mineralogical zonation with chalcopyrite at the inner and at the bottom of the structures and anhydrite at the outer part. The Cu contents range from ~4 to ~31 wt%, together with high Fe concentrations (from ~31 to ~36 wt%). The Ba-Zn chimneys are primarily composed of barite, sphalerite and pyrite (amorphous silica may occur in variable amounts). The Zn concentration is highly variable (from ~1 to 14 wt%) and comes with distinct Fe contents (from 2 to 35 wt%). The collected sulphide rubble fragments (Fig. 3b) are predominantly Cu-rich in composition (ranging from 0.2 to 8.4 wt%), the highest Zn content is ~2 wt% and Fe has a limited variation between 34 and 37

wt%. In all these sulphide fragments, the Pb and Sn concentrations do not exceed 0.5 wt% and 0.4 wt%, respectively.



Fig.3. a) Hydrothermal chimney fragment (with a total length of ~60 cm) having a Zn-rich composition showing a well-preserved central conduit. b) A visual aspect of the polymetallic massive sulphide fragments collected in the TTR-10-272-GR sample station.

#### 4. FINAL REMARKS

The large peak to through Mantle Bouguer Anomaly (MBA) observed in the Lucky Strike segment (-19 mGal) suggests the existence of focused magmatism to the segment center (Detrick *et al.*, 1995). The seismic reflection data acquired in this region allowed the identification of a surficial magmatic chamber. It is likely that the combined effects resulting from these particularities are responsible for the generation of one of the largest hydrothermal systems associated with ocean ridges. The various types of hydrothermal chimneys, their extensive spatial distribution (~1 km<sup>2</sup>) and the significant dispersal and amount of sulphide rubble indicate that the hydrothermal history in this area is very complex. This becomes even more noticeable if we consider that the development of a vent field is the result of a long series of discrete hydrothermal vents, each one having the possibility to give rise, modify and incorporate distinct sulphide bodies.

#### REFERENCES

Bougault, H. *et al.* (1997). MARFLUX/ATJ – Mid-Atlantic Ridge: hydrothermal fluxes at the

Azores Triple Junction, MAST Final Report, IFREMER, Brest.

Detrick, R.S. *et al.* (1995). Gravity anomalies and crustal thickness variations along the Mid-Atlantic Ridge between 33° and 40°N. *Journal of Geophysical Research*, 100, 3767-3787.

Escartin, J. *et al.* (2015). Hydrothermal activity along the slow-spreading Lucky Strike ridge segment (Mid-Atlantic Ridge): Distribution, heatflux, and geological control. *Earth and Planetary Science Letters*, 431, 173-185.

Ferreira, P. *et al.* (2000). Descrição das Amostras da Montanha Submarina Lucky Strike colhidas no cruzeiro TTR10 em Julho/Agosto de 2000. *Relatório Científico INGMARDEP 19/2000*. Departamento de Geologia Marinha do INETI, Alfragide, 123 pp.

Fouquet, Y. *et al.* (1995). Atlantic lava lakes and hot vents. *Nature*, 377, 201.

Humphris, S.E. *et al.* (2002). Geotectonic setting of hydrothermal activity on the summit of Lucky Strike Seamount (37°17'N, Mid-Atlantic Ridge). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, doi: 10.1029/2001GC000284.

Langmuir, C.H. *et al.* (1997). Hydrothermal vents near a mantle hot spot: the Lucky Strike vent field at 37°N on the Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 69-91.

Le Bas, M.J. *et al.* (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 30, 1299-1312.

Murton, B.J. *et al.* (2000). TTR-10 cruise carried out during July and August 2000 on the Professor Logachev Research vessel. On board description of the samples from the Lucky Strike Segment. *Scientific Report INGMARDEP 20/2000*. Dep. Geologia Marinha INETI, Alfragide, 163 pp.

Sun, S.-S., McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders & M.J. Norry, (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication 42, 313-345.

Von Damm, K.L. *et al.* (1998). The geochemical controls on vent fluids from the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 521-536.

## A herança geológica na cabeceira do canhão de Aveiro

N. Lapa (1), A. Rodrigues, (1), F. Marques (2) e A. Vinhas (1)

- (1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal; [nuno.lapa@hidrografico.pt](mailto:nuno.lapa@hidrografico.pt)  
 (1) Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia e Instituto D. Luiz.

**Resumo:** No âmbito do projeto DEEPCO (“*Deep Sedimentary conduits of the West-Iberia margin*” – FCT/POCTI/CTA /46367/2002), foram adquiridos perfis de reflexão sísmica de alta resolução na plataforma externa adjacente à cabeceira do canhão de Aveiro. Apesar do seu reduzido número, a sua interpretação permitiu refinar o modelo geológico deste setor da margem portuguesa e compreender a origem de algumas particularidades morfológicas do curso superior do canhão de Aveiro. A localização do canhão está ligada à presença de falhas que afetam a estrutura geológica profunda, reconhecida nos vários perfis analisados. A morfologia dos vales que se identificam no curso superior do canhão está condicionada pela presença destas estruturas e da ocorrência de processos de instabilidade e transferência de massa para as maiores profundidades.

**Palavras-chave:** canhão de Aveiro, plataforma continental, reflexão sísmica, estrutura geológica.

### 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A estrutura geológica do sector setentrional da plataforma continental portuguesa corresponde a um monoclinial com suave inclinação com direção predominante NW-SE a NNW-SSE. A morfologia da superfície batimétrica é muito aplanada mas, com a proximidade ao bordo da plataforma, esta tendência geral inverte-se e verifica-se um aumento significativo de relevos submarinos, controlados por fatores estruturais (Rodrigues, 2004). Na plataforma externa, a cerca de 50km ao largo de Aveiro e abaixo dos 110m de profundidade, situa-se o canhão de Aveiro, com a morfologia representada na Fig.1.

Este sistema destaca-se dos restantes canhões da margem continental portuguesa por apresentar uma morfologia em forma de anfiteatro, dissecado por inúmeros vales tributários de menores dimensões (IH, 2008).

Tendo presente esta singularidade, no âmbito do projeto DEEPCO (“*Deep Sedimentary conduits of the West-Iberia margin*”, FCT/POCTI/CTA/46367/2002), foram adquiridos novos dados de reflexão sísmica e de sedimentologia, que serviram para a aprofundar alguns aspetos referentes à morfologia e geologia da plataforma externa e vertente superior adjacentes aos canhões de Aveiro e do Porto.

Este trabalho faz parte do estudo mais recente, realizado por Lapa (2017) focando o Canhão de Aveiro, e o seu objetivo consiste na descrição da estrutura geológica da plataforma portuguesa envolvente ao canhão, em particular nos aspetos estruturais que permitem enquadrar a sua localização e a morfologia da cabeceira e curso superior.

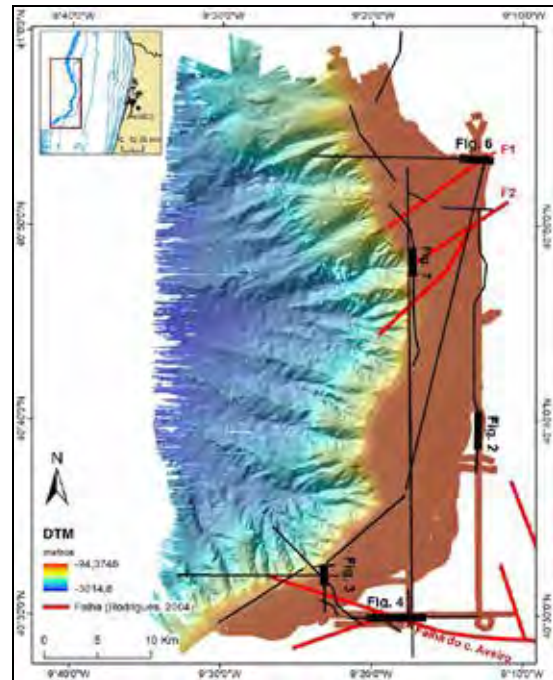


Fig. 1. Enquadramento geográfico e morfológico da área de estudo e localização dos perfis de reflexão sísmica analisados (a negro) com a identificação das linhas reproduzidas nas figuras seguintes. As linhas vermelhas representam as principais falhas.

### 2. DADOS E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo (Fig.1) foram adquiridos pelo Instituto Hidrográfico, a bordo do NRP “Almirante Gago Coutinho” entre 5 e 15 de dezembro de 2007, ao abrigo do projeto DEEPCO, consistindo em perfis de reflexão sísmica de alta resolução, adquiridos com os equipamentos *boomer* e *sub-bottom profiler* (SBP), e de registos de sonar de varrimento lateral na área envolvente ao canhão de Aveiro. Os perfis foram processados e interpretados recorrendo ao *software Delph Seismic Interpretation* da IXBlue, e a representação espacial

dos dados foi realizada no *software ArcGIS* da ESRI, sobre o Modelo Digital de Terreno (DTM) obtido a partir do levantamento com multifeixe, realizado na mesma campanha.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interpretação dos registos obtidos, nomeadamente de SBP e de *boomer*, conjugada com a análise geomorfológica da superfície batimétrica permitiu descrever as principais unidades sísmo-estratigráficas deste setor da margem portuguesa, bem como as estruturas geológicas (falhas) que as afetam.

#### 3.1. Unidades sísmicas e espessura da cobertura

A interpretação dos perfis sísmicos permitiu distinguir 3 unidades sísmicas principais, caracterizadas por fácies diferentes (Fig. 2).

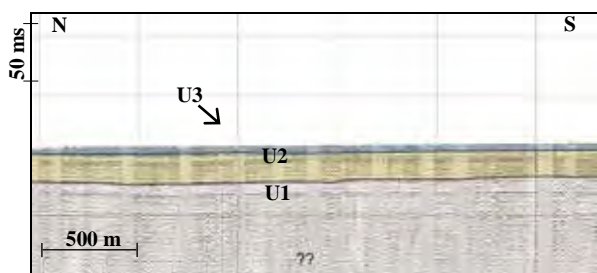


Fig. 2. Excerto da linha sísmica P20 onde são visíveis as unidades sísmicas U1 (a cinza), U2 (a amarelo) e U3 (a azul).

A unidade sísmica mais antiga, **unidade sísmica U1** encontra-se a maior profundidade e constitui o soco rochoso (*bedrock*) sobre o qual se depositaram as unidades sísmicas mais recentes U2 e U3. Como características principais, a U1 apresenta refletores pouco contínuos e refletividade moderada a baixa (Fig. 2). Com uma suave inclinação para Oeste, esta unidade encontra-se com maior expressão no sector Este da área em estudo.

A **unidade sísmica U2** é, no geral, caracterizada por refletores internos paralelos entre si, nítidos e com boa continuidade lateral, sendo a amplitude média a elevada (Fig. 2). Apesar destas características, é possível distinguir uma variação vertical e lateral de fácies sísmica dentro da unidade. À semelhança da unidade sísmica anterior, a U2 tem uma inclinação geral para Oeste, aumentando de espessura em direção ao bordo do canhão, tendo os seus refletores internos uma geometria progradante. Em certos locais da plataforma, sobretudo nas imediações das vertentes do canhão, esta unidade é aflorante.

A **unidade sísmica U3** é a unidade mais recente, estando delimitada superiormente pelo refletor que

materializa o fundo marinho, e inferiormente pelo topo da Unidade U2. Esta unidade sísmica apresenta refletores internos com boa continuidade e baixa amplitude. Tipicamente apresenta uma espessura média de cerca de 2m, com um valor máximo de 3,5m registado na zona central da área de estudo a menor profundidade (Rodrigues, 2004; Lapa, 2017). No geral, a unidade U3 tende a diminuir de espessura com o aumento da profundidade até desaparecer na zona do bordo da plataforma. Este facto foi corroborado pela presença de extensas zonas rochosas na plataforma externa, no curso superior do canhão e na vertente continental adjacente (IH, 2008; Lapa, 2017). Devido às características internas (reduzida espessura, fácies muito transparente) e geometria concordante com a unidade sísmica subjacente, a delimitação desta unidade nem sempre é fácil.

#### 3.2. Estrutura da plataforma envolvente à cabeceira do canhão

De acordo com o DTM da Fig. 1, cuja descrição pormenorizada foi apresentada por Lapa (2017), o relevo da plataforma externa e do curso superior do canhão de Aveiro, nomeadamente no que se refere à localização de vales, ravinas e presença de ruturas de declive na zona da cabeceira, é condicionado pela presença de falhas e/ou alternância de camadas com diferentes resistências à erosão, características atribuídas às formações carbonatadas do Cenozóico (Mougenot, 1989; Rodrigues, 2004).

Fazendo a correlação das unidades sísmicas observadas por aqueles autores, com as interpretadas neste estudo, propõe-se que a unidade U1 corresponda a uma sequência de idade eocénica com suave inclinação para W. Esta sequência corresponde a camadas detríticas, cuja fácies é caracteristicamente de preenchimento de bacia (Rodrigues, 2004). A unidade U2, dadas as suas características internas (refletores muito bem estratificados, contínuos e inclinados para Oeste) e por se encontrar bem desenvolvida junto ao bordo da plataforma é típica de prisma progradante. Esta unidade tem correspondência com as formações do Neogénico, constituídas por um calcário bioclástico, muito rico em foraminíferos bentónicos e planctónicos (Rodrigues, 2004). Sobre estas unidades, a unidade U3, corresponde à camada de sedimentos do Quaternário recente. Estas características foram observadas nos perfis perpendiculares ao bordo da plataforma, sendo particularmente evidente o caráter progradante de U2. Em sentido oposto, a espessura da cobertura sedimentar (U3) tende a diminuir com o aumento da profundidade. Isto deve-se ao tipo de processos dinâmica sedimentar que, atualmente, caracterizam este setor da margem, fortemente afetado pelos processos do bordo da plataforma (Jeans & Sherwin,

2001), que, intensificados pela presença do canhão, impedem a acumulação das partículas.

A variação do declive da vertente não é uniforme ao longo da área, sendo marcada por algumas ruturas de declive (Lapa *et. al.*, 2016; Lapa, 2017) que refletem não só alternância de camadas brandas com camadas mais resistentes do substrato, como também a presença de falhas ou eventuais estruturas rotacionais de colapso de vertente (Fig.3).

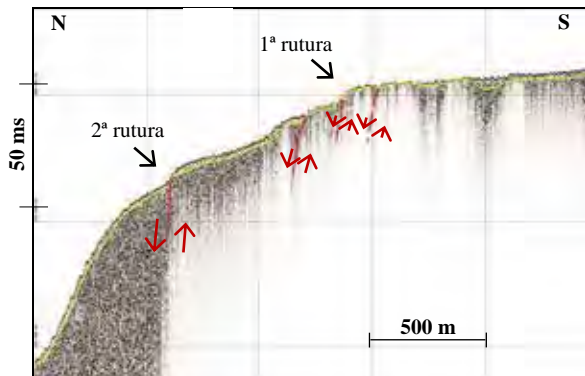


Fig. 3. Excerto da linha sísmica SBP P60 onde se observa a diminuição da cobertura sedimentar recente (unidade sísmica U3, delimitada inferiormente pelo refletor amarelo – topo da U2) em direção à vertente do canhão, e duas principais ruturas de declive.

Neste sector, Rodrigues (2004) cartografou uma falha que atravessa perpendicularmente toda a plataforma média e que, aparentemente, poderá estar na origem e controlo morfológico do canhão, a **falha do canhão de Aveiro**. Nos perfis analisados, a estrutura foi identificada na zona envolvente à cabeceira do canhão, aos cerca de 130 metros de

profundidade (Fig. 4). A estrutura afeta as unidades sísmicas mais antigas, provocando o abatimento do bloco setentrional e um ligeiro arqueamento dos refletores junto à estrutura (Fig. 4).

De acordo com os critérios descritos por Rodrigues (2004), o movimento cinemático desta falha é do tipo desligamento direito, com abatimento do bloco Norte. As imagens acústicas do fundo, obtidas com sonar de varrimento lateral nas imediações da falha, mostram a existência de uma rede de fracturação, na sua maioria NE-SW, que afeta o fundo rochoso (Fig. 5). A diferença de refletância da superfície do fundo corresponde a diferentes matérias (os afloramentos rochosos apresentam-se com tonalidades de cinza claro e os diferentes depósitos sedimentares em cinza mais escuro). De acordo com a sequência sismo-estratigráfica apresentada por Rodrigues (2004), no local afloram as formações de calcário bioclástico do Neogénico (U2), o que permite justificar a presença desta fracturação nas bancadas competentes. Os lineamentos e fraturas observados foram atribuídos a fenómenos de diaclasamento associados à movimentação da falha.

Utilizando um ROV (*Remoted Operated Vehicle*) Rodrigues (2004) visualizou na zona de afloramento da falha, a Este da área de estudo, um conjunto de fendas de tração de orientação NE-SW escalonadas para SW, cuja disposição entra em concordância com a direção principal do campo de tensões de compressão máxima de direção E-W a WNW-ESE, nesta região da plataforma continental (Cabral & Ribeiro, 1989; Cabral, 1993; Rodrigues, 2004).

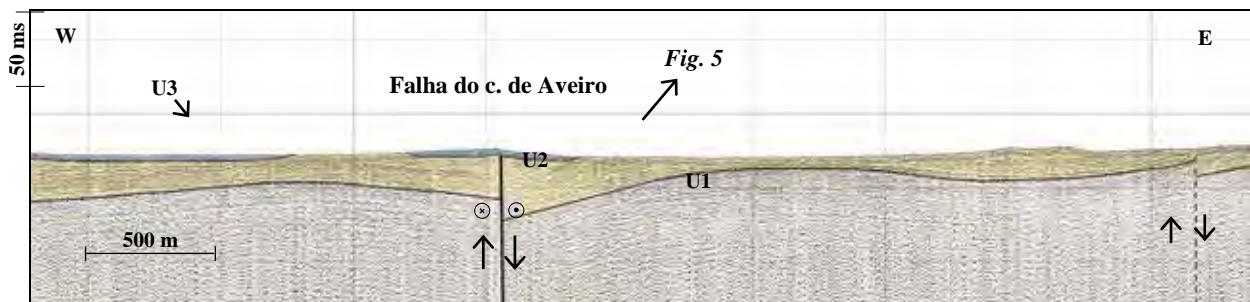


Fig. 4. Identificação da falha do canhão de Aveiro no perfil 39. Localização na Fig. 1.

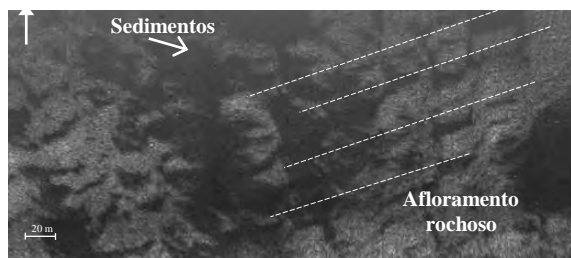


Fig. 5. Imagem de sonar a evidenciar a presença de um conjunto de discontinuidades na proximidade da zona de afloramento da Falha do C. Aveiro (localização na fig.4).

Para além da falha do canhão de Aveiro, foram também identificadas, na zona da plataforma externa mais a Norte, duas estruturas subparalelas de direção NE-SW, designadas por F1 e F2 (Figs. 6 e 7).

A mais setentrional, F1, tem movimentação normal, com abatimento do bloco Este, e coloca a aflorar a unidade sísmica U1, dando origem a um pequeno relevo de resistência na superfície do fundo marinho.



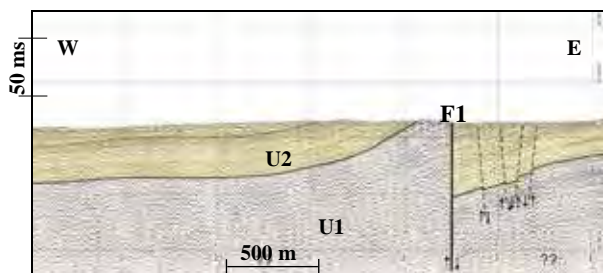


Fig. 6. Extrato do linha sísmica P35 a evidenciar a falha F1 localizada no sector Norte da área em estudo.

A falha, F2, paralela à anterior, mas localizada imediatamente a Sul, é uma falha normal, com subsidência do bloco Norte.

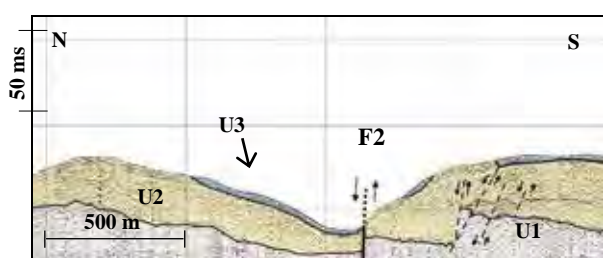


Fig. 7. Extrato do perfil P23 com a falha F2 a cerca de 215 metros de profundidade, no sector Norte.

Dadas as características cinemáticas das falhas F1 e F2, orientadas NE-SW e a sua localização geográfica, afetando o setor Norte da cabeceira do canhão, avançou-se com a hipótese de que a zona central da cabeceira do canhão corresponderá à expressão morfológica do abatimento do bloco central entre as duas famílias de falhas.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise de perfis de reflexão sísmica de alta resolução, adquiridos na plataforma externa em redor da cabeceira do canhão de Aveiro foi possível confirmar a estrutura geológica da plataforma externa envolvente à cabeceira do canhão de Aveiro. As unidades sísmicas são compatíveis com as unidades avançadas por Rodrigues (2004), as quais apontam para a presença de formações terciárias do Eocénico (U1), Miocénico (U2) e Quaternário Recente (U3), afetadas por diversas estruturas frágeis, que se prolongam desde a plataforma externa até à vertente superior e controlam a localização e morfologia da cabeceira do canhão de Aveiro.

É ainda de referir que as diferenças no declive morfológico e a presença de ruturas de pendor na zona da cabeceira foram justificadas pela erosão diferencial das unidades expostas à superfície, devido à alternância de camadas brandas e camadas mais resistentes, e por estruturas associadas à instabilidade do bordo (movimentos de massa).

Com as observações realizadas, ao nível da localização e movimentação das principais estruturas geológicas, foi possível associar a localização deste canhão com a presença da falha normal de direção WNW-ESE (falha do canhão de Aveiro), identificada por Rodrigues (2004) na plataforma média e externa, e atribuir a configuração em anfiteatro da cabeceira do canhão à movimentação de 2 famílias de falhas conjugadas, com abatimento do bloco central (a falha do canhão de Aveiro, a Sul, e duas falhas conjugadas, a Norte). Esta última consideração carece de confirmação com dados adicionais.

#### REFERÊNCIAS

- Cabral, J.; Ribeiro, A. (1989) – *Nota explicativa da Carta Neotectónica de Portugal Continental*. Escala 1:1 000 000. Serviços Geológicos de Portugal.
- Cabral, J. (1993) – *Neotectónica de Portugal Continental*. Dissertação para obtenção do grau, Univ. de Lisboa, 345 p. (não publicado).
- Instituto Hidrográfico (2008) – *Relatório de final de trabalhos: Condutas Sedimentares Profundas da Margem Oeste Portuguesa (3º relatório de execução)*. Instituto Hidrográfico – Divisão de Geologia Marinha, Lisboa.
- Jeans, D.R.G. e Sherwin, T.J. (2001) – The variability of strongly non-linear solitary internal waves observed during an upwelling season on the Portuguese shelf. *Continental Shelf Research*, 21: 1855-1878.
- Lapa, N. (2017) – *Estudo morfo-sedimentar do Canhão de Aveiro*. Dissertação de Mestrado. Fac. Ciências da Univ. de Lisboa. 82 pp (não publicado).
- Lapa, N.; Rodrigues, A.; Marques, F. (2016) – Análise morfo-sedimentar da cabeceira do canhão de Aveiro. *4ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa.
- Mougenot, D. (1989) – *Geologia da margem Portuguesa*. Dissertação para obtenção do grau de Doutoramento. Documentos Técnicos, Instituto Hidrográfico, 32, 259 pp (não publicado).
- Rodrigues, A. (2004) – *Tectono-Estratigrafia da Plataforma Continental Setentrional Portuguesa*. Dissertação de Doutoramento, Fac. Ciências da Univ. de Lisboa, 244 pp. (não publicado).

## Caracterização da cobertura recente da plataforma continental ao largo de Sesimbra: primeiros resultados

A. Vinhas (1), A. Rodrigues (1) e N. Pimentel (2)

(1) Instituto Hidrográfico. [andre.costa@hidrografico.pt](mailto:andre.costa@hidrografico.pt)

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

**Resumo:** A plataforma continental adjacente à cadeia da Arrábida tem cerca de 15 km de largura até ao bordo e inclui o delta submarino do rio Sado, que se localiza no seu limite NE, no extremo norte da península de Tróia. Na zona do bordo é de referir a presença das cabeceiras de dois vales importantes (o canhão submarino de Lisboa, a Oeste, e de Setúbal, a Sul). Com este enquadramento geográfico, as fontes sedimentares para a cobertura sedimentar marinha são sobretudo o estuário do Sado e a erosão costeira, em especial das escarpas íngremes da cadeia da Arrábida. Com recurso a registos de reflexão sísmica monocanal, adquiridos pelo Instituto Hidrográfico, é apresentado um mapa de espessuras preliminar da cobertura sedimentar depositada sobre uma superfície erosiva atribuída ao último período glaciário (18 000 anos), e tecidas algumas considerações sobre a posterior evolução dos ambientes sedimentares marinhos.

**Palavras-chave:** Perfis sísmicos, plataforma continental, cadeia da Arrábida, variações eustáticas

### 1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a descrição da estrutura interna da cobertura sedimentar presente na plataforma continental adjacente à cadeia da Arrábida e contribuir para a compreensão da evolução recente (últimos 18 000 anos) do ambiente marinho.

### 2. ENQUADRAMENTO

A cadeia orogénica da Arrábida está localizada no sector meridional da Bacia Lusitaniana (BL), cuja origem se atribui à interação geodinâmica entre as placas litosféricas Euroasiática e Núbica, que levaram à inversão da bacia no decorrer do Miocénico. Na margem oeste-ibérica, esta cadeia é um dos relevos mais importantes que, com uma orientação ENE-WSW e extensão de cerca de 30 km, domina a orla costeira entre o estuário do rio Sado e o Cabo Espichel. As interações tectónicas que elevaram toda a cadeia da Arrábida permitiram a exposição das formações sedimentares que a constituem, com variação de idades entre o Jurássico inferior (Hetangiano) e o Miocénico superior (Tortoniano), sendo as suas litofácies essencialmente carbonatadas, dolomíticas e margosas, com algumas intercalações mais detríticas a partir do Jurássico superior. No setor submarino, as poucas amostras colhidas nos afloramentos rochosos (Boillot *et al.*, 1974), permitiram estender estas formações para a plataforma adjacente, onde se encontram cobertas por formação sedimentar recente.

As características desta camada refletem os processos de dinâmica sedimentar recente que atuam no setor, em particular o fornecimento de partículas terrígenas e a ação dos agentes físicos que promovem o transporte e acumulação das mesmas, os quais estão

em equilíbrio com as condições climáticas dominantes e, em particular, com a posição do nível médio do mar (NMM).

Trabalhos realizados na bacia atlântica, no âmbito do projeto CLIMAP (1976) mostram a variabilidade climática que afetou o Atlântico Norte desde o Último Máximo Glaciário (UMG), que terminou há 18 000 anos. Como reflexo da posição da Frente Polar, muito próxima de latitudes portuguesas, grandes volumes de águas estavam retidas em calotes e glaciares e o NMM encontrava-se a cotas muito mais baixas do que as atuais. Dias (1985, 1987) publicou pela primeira vez a curva de variação do nível médio do mar para o sector setentrional da plataforma continental portuguesa, referentes aos últimos 18 000 anos (Figura 1). Posteriormente, com os trabalhos desenvolvidos por outros autores, foi possível estender a aplicação desta curva a toda a plataforma de Portugal continental (Dias *et al.*, 1997).

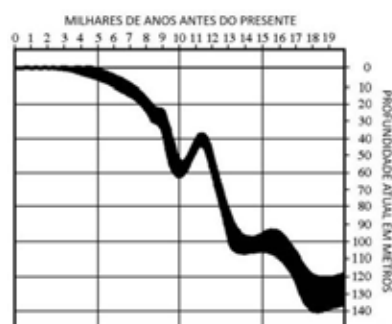


Fig.1. Curva de variação do nível médio do mar, na plataforma continental setentrional portuguesa, desde o último máximo glaciário (UMG) (adaptado de Dias *et al.*, 1997).

Em termos orográficos, a cadeia da Arrábida corresponde a um relevo muito jovem que, segundo

Fonseca *et al.*, (2015), se pode dividir em 3 unidades distintas (Figura 2A): acima dos 220m de altitude encontram-se as serras do Formosinho e S. Luís; entre esta cota e os 190m de altitude, distingue-se a Plataforma do Cabo, no setor mais ocidental; e abaixo dos 190m os restantes relevos onde se inclui o vale tifónico de Sesimbra. Com esta morfologia e assimetria estrutural, a rede de drenagem desenvolve-se substancialmente no flanco norte da cadeia, sendo muito reduzida para sul. Neste sentido, o contributo fluvial para a área em estudo é muito reduzido, com exceção do rio Sado, que desagua a oriente do setor e constitui a principal fonte de partículas de origem fluvial.

No setor submerso da cadeia, a plataforma continental, limitada pelos entalhes dos Canhões de Lisboa (a oeste) e de Setúbal (a sul), tem 15km de largura média, distinguindo-se três setores morfológicos (Figura 2B): (1) uma rampa convexa costeira que se prolonga até aos 100m de profundidade ( $\approx 3$ km de largura); (2) uma superfície aplanada pouco inclinada que se estende por 5km até próximo dos 150m de profundidade; (3) e um sector externo mais inclinado, abaixo dessa profundidade e que se prolonga até ao bordo da plataforma (Vanney e Mougenot, 1981).

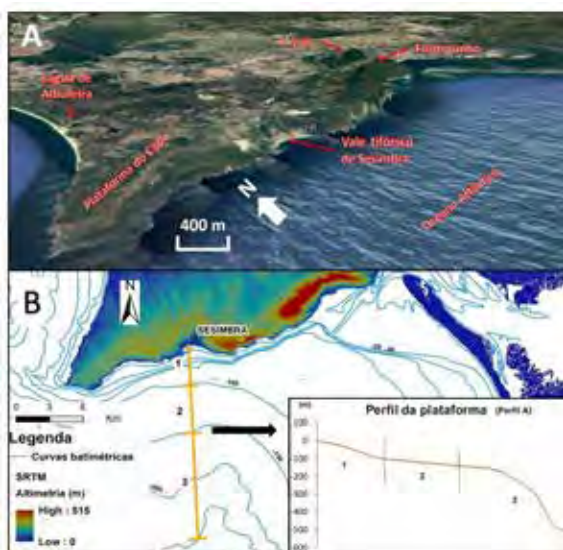


Fig. 2. (A) Orografia da cadeia da Arrábida (adapt. de Fonseca *et al.* 2015). (B) Morfologia da plataforma a sul da Cadeia da Arrábida, representada pelas curvas batimétricas (10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 300m) a azul e perfil batimétrico com identificação dos 3 sectores morfológicos (adapt. de Vinhas e Rodrigues, 2016).

### 3. ORIGEM DOS DADOS E METODOLOGIA

No decorrer deste trabalho foram interpretadas 23 perfis de reflexão sísmica de alta resolução (sistema *boomer*), adquiridas pelo Instituto Hidrográfico em diversas campanhas entre 2005 e 2017, cobrindo a área de interesse. Os registos sísmicos, foram processados e interpretados no *software Delph Seismic* da IXBLUE, tendo sido aplicadas correções diversas (*layback*, *swell* e *stacking*), filtros passa-

banda e ganhos do sinal. A interpretação sísmo-estratigráfica, e individualização das diversas unidades sísmicas teve como base a metodologia formalizada por Mitchum & Vail (1977), e descrita posteriormente por Roque (2007), em especial a referente à classificação acústica de reflexões e ao tipo de terminação e geometria de refletores.

A espessura da cobertura sedimentar interpretada ao longo de cada perfil foi exportada em distância vertical (milissegundos-tempo duplo, *ms twt*) entre os refletores que delimitam esta camada no topo (Fundo) e na base (UMG?), e posteriormente convertida para unidade métrica assumindo um valor de 1800 m/s, valor que Hamilton & Bachman, (1982) determinaram para a velocidade de propagação do som em sedimentos arenosos de ambiente de plataforma. A interpolação foi realizada posteriormente através do método IDW (Inverse Distance Weighted) para criar um mapa de espessuras da cobertura superficial.

### 4. RESULTADOS

No setor estudado, a análise sísmo-estratigráfica dos perfis, mostra a presença de três unidades sísmicas (Figura 3) que compõem o pacote da cobertura sedimentar posterior ao enchimento Plio-Quaternário (Boillot *et al.*, 1974).

Dadas as características acústicas do refletor da base desta cobertura (de grande continuidade e amplitude), bem como a sua extensão regional (superfície aplanada no sector W e rugosa no sector E, com inclinação  $<1^\circ$  para WSW), a sua origem foi atribuída a processos de abrasão marinha, retocados por exposição subaérea. Estes processos terão ocorrido durante os períodos em que o NMM se encontrava a cotas mais baixas do que a presente. Considerando os resultados do Programa CLIMAP e a curva de variação do NMM na plataforma portuguesa, foi-lhe atribuída a designação UMG(?), por se ter considerado que representou a paleotopografia durante o Último Máximo Glaciar.

Este refletor está coberto pelas unidades sísmicas U1, U2 e U3, formadas posteriormente ao UMG, e refletindo diferentes fases evolutivas do ambiente marinho.

A **unidade sísmica U1**, é a mais antiga deste período, encontrando-se delimitada na base pelo refletor UMG (?) e no topo pelo refletor R1. A sua fácies é caracterizada por reflexões internas de baixa e média amplitudes e frequências, com uma geometria variável segundo as direções WSW-ENE (Linhas 35, Figura 3) e N-S (Linha 2, Figura 3). No sector ocidental, junto ao Cabo Espichel, as reflexões internas desta unidade são progradantes sigmoidais, indicando desenvolvimento no sentido do bordo da plataforma (Linha 2, Figura 3), enquanto na restante área a geometria é paralela a sub-paralela horizontal (Linha 6 na Figura 3).

A **unidade sísmica U2** é delimitada na base pelo refletor R1, contínuo e de amplitude média, e no topo pelo refletor R2, de amplitude média e boa continuidade (Linha 35, Figura 3). Internamente, a U2 possui reflexões internas com amplitudes variáveis e de elevada frequência, com boa continuidade e configuração progradante sigmoidal no sentido ENE (Linha 2, Figura 3) e S (Linha 35, Figura 3). Localmente esta unidade poderá incluir uma sub-unidade (U2a), delimitada superiormente pelo refletor R1a, com reflexões internas irregulares, difusas e configuração caótica. A unidade sísmica U2 encontra-se bem representada no sector ocidental da área, na proximidade do Cabo Espichel, diminuindo de expressão até à zona de Sesimbra.

No topo da sequência, foi identificada a **unidade sísmica U3**, a mais recente. Está delimitada inferiormente pelo refletor R2 e superiormente pelo refletor Fundo, contínuo e de forte amplitude que corresponde ao fundo do mar. Do ponto de vista de fácies sísmica, apresenta reflexões internas com amplitude e frequência variáveis, configuração paralela a sub-paralela e horizontal. Esta unidade é muito extensa, observando-se nítida variação lateral nos atributos sísmicos, compatível com a variabilidade dos processos que estão na sua origem.

Com a análise do mapa de espessuras, representado na Figura 4A, é possível constatar que a camada

sedimentar (integrando as três unidades sísmicas descritas), tem espessura média de 10 metros, podendo atingir valores superiores aos 15 metros de espessura, ou mesmo chegar aos 50 metros, em locais muito constrangidos. Tal é o caso de uma estrutura junto ao doma da Cova da Mijona (W de Sesimbra), apesar da identificação do refletor UMG (?) estar mascarado por múltiplas reflexões parasitas, ou junto às arribas de traçado irregular que se encontram a leste de Sesimbra, onde se identificou um depósito de massa de grandes dimensões, com 3 a 4km de extensão.

Relativamente à interpretação estratigráfica deste pacote, considerando que na base está delimitado pelo refletor UMG (?), foi-lhe atribuída uma idade posterior a 18 000 anos. Partindo deste pressuposto, propõe-se que a unidade U1 tenha sido formada durante a primeira fase do período de deglaciação (18 000 aos 13 000 anos, quando o degelo causou subida do NMM da cota -130m até aos -100/-110m), a unidade U2 corresponda à fase seguinte (13 000 aos 11 000 anos), quando o NMM subiu rapidamente dos -100/-110m até aos -40m. Por último, a unidade U3 representa todo o Holocénico e a subida do NMM desde os -60m até à sua posição atual. A Figura 4B representa a posição do NMM ao longo das diferentes fases do período pós-glaciar.

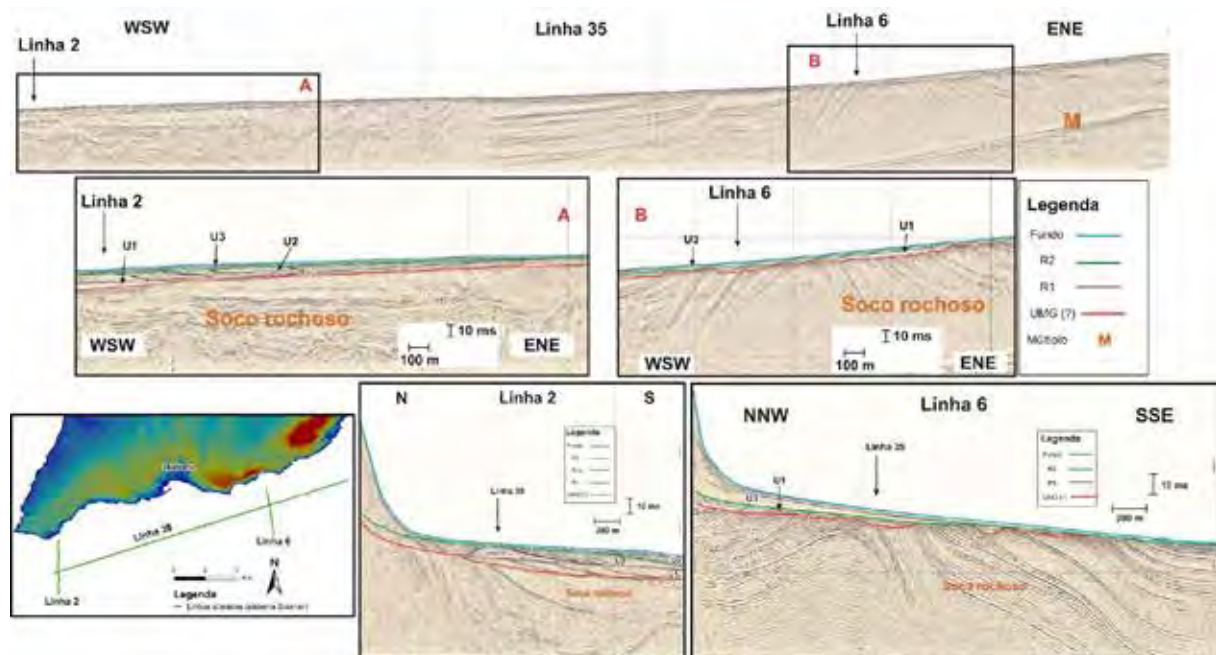


Fig.3. Interpretação sísmo-estratigráfica das linhas sísmicas 2, 6 e 35.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interpretação da malha de perfis adquiridos nos últimos anos pelo Instituto Hidrográfico ao largo da cadeia da Arrábida possibilitou a caracterização das unidades mais recentes da sequência sísmo-estratigráfica deste setor da margem portuguesa e a

criação do mapa de espessuras da cobertura sedimentar recente. Esta sequência tem uma espessura média de 10 m, estando a sua origem relacionada com a evolução do nível médio do mar desde o Último Máximo Glaciar e a ocorrência de processos de preenchimento de bacias localizadas e escorregamentos de vertente de grande magnitude. O

contributo da rede de drenagem, para este setor da plataforma parece ser insignificante, com exceção do rio Sado.

Foram identificadas três unidades cujas configurações e fácies sísmicas permite considerá-las como sequências sedimentares formadas durante os três períodos em que o NMM sofreu maior taxa de subida. Estas unidades estarão delimitadas por refletores que materializam os períodos intermédios em que o NMM esteve estabilizado ou sofreu movimentos de abaixamento.

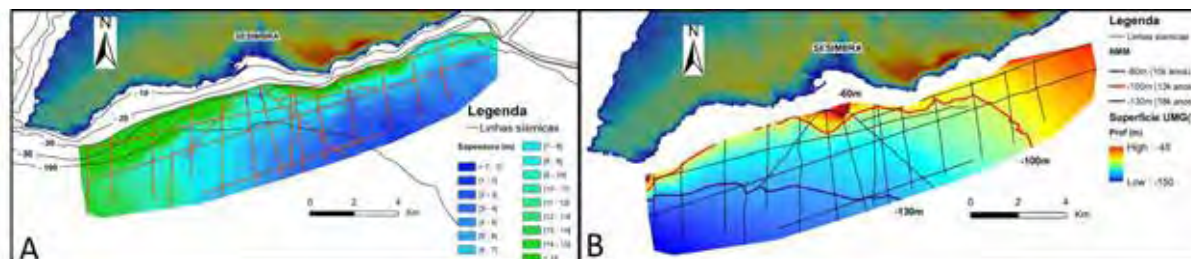


Fig.4 (A) Mapa de espessuras da cobertura sedimentar na plataforma continental a sul da cadeia da Arrábida; (B) Superfície de localização do refletor UMG (?) e localização da cota de estabilização do NMM durante a evolução pós-glaciária aos -130m, -100m e -60m.

## REFERÊNCIAS

- Boillot, G.; Dupeuble, P. A.; et Mougenot, D. (1974). Géologie du plateau continental portugais entre le Cap Carvoeiro et le Cap de Sines. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 279, p. 887-890.
- Brito, P. O. (2009). *Impactos da elevação do nível médio do mar em ambientes costeiros: O caso do estuário do Sado*. Tese de doutoramento, Univ. Lisboa, 148p.
- Brito, P.; Terrinha, P.; Rebêlo, L.; Monteiro, H. (2005). Deltaic sedimentary structure interpreted from high-resolution seismic data: Sado estuary, Portugal. *Iberian Coastal Holocene Paleoenvironmental – COASTAL HOPE*, FCUL, Lisboa, p.15-16.
- CLIMAP Project Members (1976). The surface of the ice-age earth. *Science*, 191: 1131 – 1137.
- Dias, J. M. A. (1985). Registos da migração da linha de costa nos últimos 18000 anos na plataforma continental portuguesa setentrional. *Actas da 1ª Reunião Quaternário Ibérico*, I, Lisboa, p. 281 – 295.
- Dias, J. M. A. (1987). *Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional*. Tese de doutoramento, Univ. Lisboa, 384p. (não publicado e anexos).
- Dias, J. M. A., Rodrigues, A., Magalhães, F. (1997). Evolução da linha de costa em Portugal, desde o último máximo glaciário: Síntese dos conhecimentos. *Estudos do Quaternário*, I, APEQ, Lisboa, p. 53 – 66.
- Fonseca, A. F.; Zêzere, J. L.; Neves, M. (2015). Contribuição para o conhecimento da geomorfologia da cadeia da Arrábida (Portugal): Cartografia geomorfológica e geomorfometria. *Rev. Brasileira de Geomorf.*, v. 16(, nº 1), S. Paulo, p.: 137 – 163. ISSN 2236-5664.
- Hamilton, E.L.; Bachman (1982). Sound velocity and related properties in marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(6):1891 – 1904.
- Mitchum, R. M. Jr.; Vail, P. R. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic stratigraphic interpretation procedure. In: *Seismic Stratigraphy – App. Hydrocarbon Exp.* Payton, C. E. (Ed.). *Am. Ass. Petrol. Geol.*, Mem. 26:, 135 – 143.
- Roque, C. (2007). *Tectonoestratigrafia do Cenozóico das margens continentais sul e sudoeste portuguesas: um modelo de correlação sismoestratigrafica*. Tese de doutoramento, Dep. Geologia, Lisboa, Fac. Ciências da Univ. Lisboa. 316p.
- Vanney, J. R.; Mougenot, D., (1981). La plateforme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: Analyse Geomorphologique. *Mem. Serv. Geol. Portugal*. 28, 86 p.
- Vinhas, A.; Rodrigues, A. (2016). Principais estruturas geológicas observadas na plataforma continental ao largo de Sesimbra. *Actas das 4ªs Jorn. de Eng. Hidro.*, Lisboa, 21-23 de Junho de 2016, Inst. Hidro., Lisboa., 355-358p.

# The submarine morphology of the Selvagens Islands

R. Santos (1), R. Quartau (1) and A. Rodrigues (1)

(1) Divisão de Geologia Marinha do Instituto Hidrográfico – Marinha. ruben.santos@hidrografico.pt

**Abstract:** The submarine morphology of the oldest islands of Madeira archipelago are studied through bathymetric, backscatter and seismic data acquired during the SEDMAR program. This has allowed a better understanding how volcanic, gravitational, erosional and sedimentary have shaped their submarine flanks. The islands have very wide shelves when compared to their present elevation, have very few sediments, and their edges show several scars. Volcanic cones are restricted to the shelf of Selvagem Grande, the area between both islands and the flanks of the main insular edifice. These flanks are also dissected by a channel system that at its end shows a series of scours. The drainage is probably formed by turbidity currents that produce hydraulic jumps when gradients are heavily reduced at the base of the edifice, creating the scours.

**Key words:** submarine morphology, Selvagens Islands, Madeira Archipelago.

## 1. INTRODUCTION

Volcanic islands are the emerged portions of large edifices that rise from the seafloor up to a few kilometers. Although islands provide insights into their evolution, their study only offers a small part of the history of the submarine rise, subaerial building and erosion of the entire volcanic edifices. Therefore, the study of their submarine environment together with subaerial observations can provide us a

much more detailed picture of the volcanic edifices evolution above and below sea level.

In this work, we studied the submarine morphology of the two oldest islands of the Madeira archipelago (Geldmacher *et al.*, 2001), Selvagem Grande and Selvagem Pequena, localized nearby the Canary archipelago (Fig. 1A). The two islands rise from the seafloor at depths of more than 4,000 m as a unique edifice that is split in two at ~900 m (Fig. 1B).

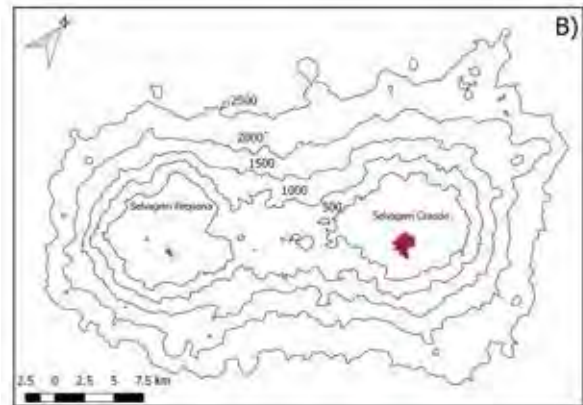
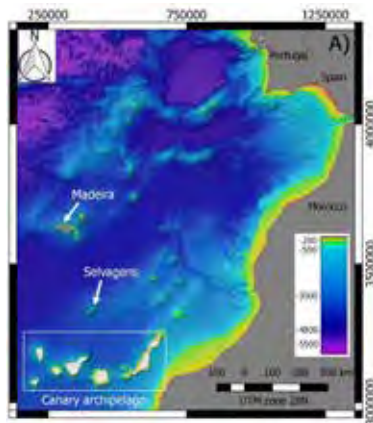


Fig. 1. A) Location of Selvagens Islands between Madeira Island and the Canary archipelago. The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) is used as background and the color bars represent the depths (in meters). Gray areas represent the continental and island landmasses. B) Contours derived from EMODnet project around the Selvagem Grande and Selvagem Pequena islands (remaining islets in brown color).

## 2. Materials and Methods

The data used in this study was acquired by the Portuguese Hydrographic Institute (IH) in 2009, using Kongsberg EM120 (12 kHz) and EM710 (70-100 kHz) multibeam echo-sounders onboard N.R.P. “Alm. Gago Coutinho” and EM3002 (300 kHz) onboard the survey launch “Cagarra”. The hydrographic data positioning was guaranteed

through inertial sensors and a Global Navigation Satellite System (GNSS) in differential mode and processed using the Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator algorithm (Calder and Mayer, 2003) implemented in Caris HIPS & SIPS software. The resolution of the digital elevation models (Fig. 2) were produced with cell-size varying from 2 m in shallower areas to 128 m for deeper areas.

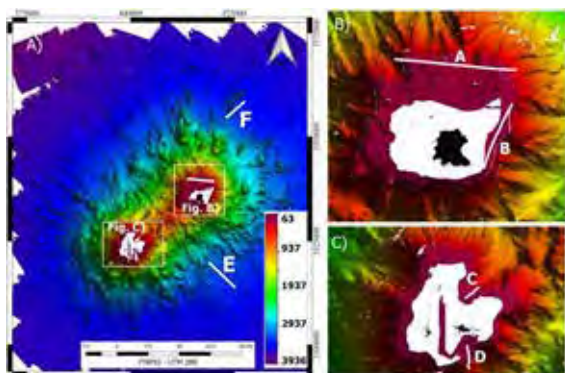


Fig. 2. (A) Bathymetric surface from Selvagens Islands. The letters E and F represent the reflection seismic survey lines. (B) Bathymetry from Selvagem Grande Island and location of A and B reflection seismic survey lines. (C) Bathymetry from Selvagem Pequena Island and location of C and D reflection seismic survey lines (Fig. 5). The unit of color bar is meter.

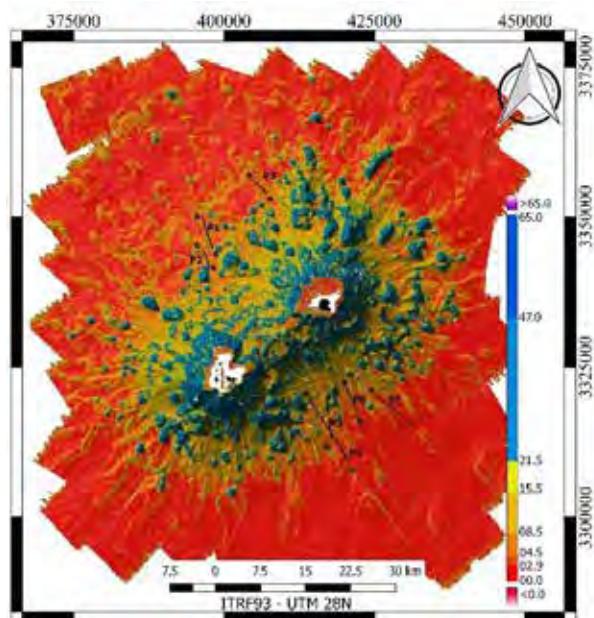


Fig. 3. Gradient map from Selvagens Islands and location of the cross-section (Fig. 7)

The radiometric and geometric corrections were also applied to the raw data with Geocoder algorithm (Fonseca and Calder, 2005) implemented in Fledermaus Pro allowing the determination of the backscatter strength (BS) mosaics, where is visible the different acoustic responses (Fig. 4). Results from the morphological description were complemented with reflection seismic lines (survey lines in Fig. 2 and Fig. 5) acquired by IH (SEDMAR 2017 campaign, N.R.P. “Alm. Gago Coutinho” in May 2017), through ECHOES 3500 sub-bottom profiler from IXBLUE.

### 3. Results

#### 3.1. Shelves and flanks

The cross shelf morphology reveals some peculiar elements, such as the presence of local shelf slope ruptures ( $\sim 40$  m depth) in protected areas of the southern shelves, associated with prominent progradational sedimentary bodies.

The insular shelves are very similar between the two islands. The shelves in plan-view are roughly circular with a diameter of  $\sim 8$  km for Selvagem Grande and  $\sim 7.5$  km in Selvagem Pequena.

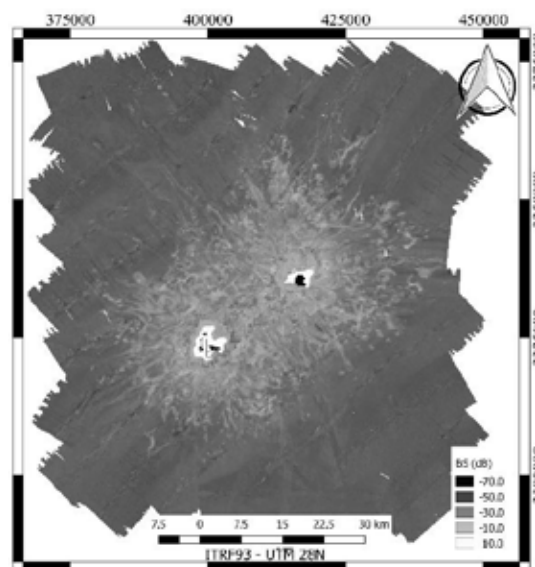


Fig. 4. Backscatter strength mosaics from the raw data acquired by the EM120, EM710 and EM3002 multibeam systems.

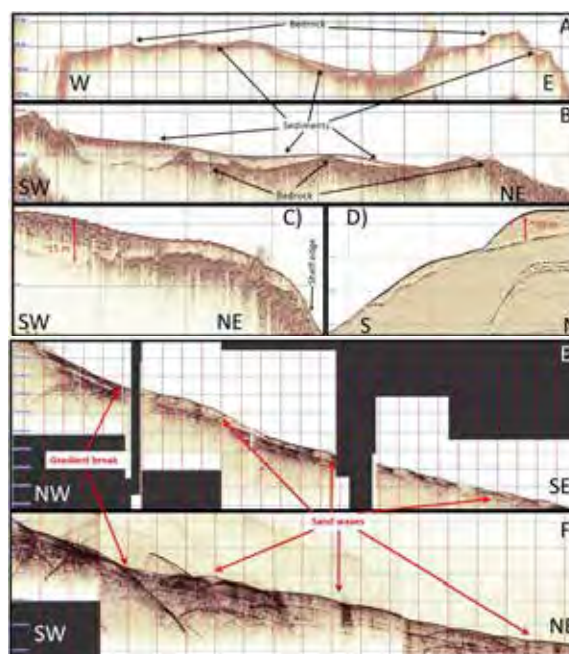


Fig. 5. Reflection seismic data. A), B), C) and D) shows the majority of outcrop rocky and some sedimentary deposits; Sedimentary structure from sedimentary waves are shown in E) and F).

The width of the shelves is larger in the northern part and the gradients are lower ( $\sim 0.5^\circ$ ). Generally, the seafloor is rocky or covered by very coarse sediments, as the high backscatter strength suggests (Fig. 4). The expedite analysis of the seismic reflection data confirmed that sedimentary layer is thinner (5-10 m) when compared with southern shelves (up to  $\sim 20$  m of thickness).

The depths along the shelf edges reveal a significant variation (40-150 m). The majority of the shallower regions coincides with thick deposits (southern shelf edges), whilst the deeper regions are mostly rocky and coarse sediment seafloors at the northern sides. Despite the similarities, only the shelf of Selvagem Grande presents small cones scattered on the northern part.



Fig. 6. Submarine morphologies: landslides; scours, small volcanoes, sediment wave fields, channels. Numerical annotations (1, 2, 3, ..., 12) correspond to the numbers of landslide scars.

The shelf edges are characterized by an abrupt gradient variation, between  $16^\circ$  and  $20^\circ$  that persists on the upper flanks of the islands until they reach -2,200 m. Near the base of the volcanic edifice, between 2,200 and 3,200 m gradients decrease to  $7^\circ$ - $8^\circ$ . The flanks are dissected by a large channel network (Fig. 6).

### 3.2. Volcanic cones

Small volcanic cones are scattered mainly on three regions: shelf of Selvagem Grande, inter-region between the two islands and surrounding the base of the insular edifice.

The smaller cones are localized on the northern shelf of Selvagem Grande with a mean diameter of 300 m and mean elevation of 40 m. The larger cones are observed at the shelf edge, reaching a maximum diameter of 600 m and an elevation of 100 m at the southwest.

In the inter-islands region are two major cones aligned and connected through a long volcanic crest, oriented along the NE- SW. The crest elevation reaches 200 m, it is 1,700 m wide and 9,000 m long.

The base of the main insular edifice is also full of cones. They have maximum diameters of 4,000 m and maximum elevations of 500 m. There are also volcanic crests arranged radially around the insular

edifice that can reach 1,000 m wide, and ~5,000 m long with 600 m height.

### 3.3. Landslides

The shelf edges show several scars that suggest the occurrence of landslides (Fig. 6). The dimension of the headwall scars varies between 300 – 3,100 m and their areas between 0.01 and 0.5 km<sup>2</sup>. Those volumes may have been released as a single massive landslide or as several small events. The debris flows that were likely produced by these events are not observed on the seafloor. This fact can suggest that they are now covered by sediments or may have occurred in several small events and the sediments were scattered along the channel network down to the edifice base. The shelf edge orientation reveals that the majority of the larger scar areas are localized on the N side of Selvagens Islands.

### 3.4. Channels

The submarine flanks of Selvagens islands are characterized by a complex network of channels. The main channels begin at the shelf edges and extend for ~17 km until they reach the base of the insular main edifice. Along the channels, gradients vary between  $15^\circ$ - $20^\circ$  in the first 8-12 kilometers, decreasing to  $3^\circ$ - $4^\circ$  when reaching the base of the edifice. The cross-section of the channels is rectangular or U-shaped and the width can be up to ~0.5-4.1 km.

The backscatter mosaic shows high intensity values along the center of the channels, which can be correlated to coarse sediments.

### 3.5. Sediment wave fields

Sediment wave fields are localized at the NW and SE of Selvagem Grande (Fig. 3). The shallower part of the sediment waves is observed between -2,700 and -3,150 m (Fig. 7). Their extension along the slope varies between 3 and 12 km with a mean gradient of  $2.5^\circ$  and they stop at 3,125 – 3,350 m. Generally, the sediment wave fields begin at the transition between the high-gradient flanks and the base of the insular edifice, where the gradients are reduced to  $\sim 7^\circ$  -  $\sim 2.5^\circ$ . The dimension of the waves appears to be random with the exception of two sites, the p1 and p5 (Fig. 6), where the wavelength increases with depth (Fig. 7).

The backscatter strength varies along the sediment waves, with low values localized at the stoss sides and the higher ones at the trough regions. This may suggest that coarse sediments are at the troughs and finer sediments are on the stoss sides.

The sedimentary structure of the waves suggest a migration upslope due to the slight vertical inclination of the seismic reflectors at the trough regions. However, there are some exceptions where the vertical inclination suggests downslope migrations (Fig. 7).



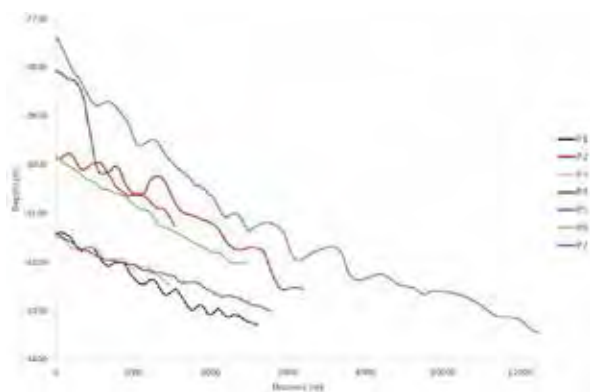


Fig. 7. Cross-section P1 to P7 of sediment wave fields.

### 3.6. Scours

Scour features were identified in the gradient map as headwall scars rectangular or U-shaped in cross-section. Some of them are transverse and others are parallel to the main slope (Fig. 6). They are localized around the base of the insular edifice within the depth range 3300-3800 m. Their dimensions vary between 3 - 20 km in width, 10 - 20 km in length, and 40 - 100 m in depth. The scours occur at the end of the channels system, where seafloor gradients are reduced to 0.5° and 3.0°.

## 4. Discussion and Conclusions

The shelves were formed by erosion of the flanks of Selvagem Grande and Selvagem Pequena edifices. They are at a mature stage, since the distance between the coastline and the shelf break (3.5 - 4.5 km) is much larger than the height of the subaerial edifices (~160 m and ~10 m, Geldmacher *et al.*, 2001), indicating a long period of erosion. The northern shelves are larger than the southern ones, which is compatible with the higher frequency and height of waves from that quadrant.

Several small and well preserved cones were identified on the shelf of Selvagem Grande, which means that they are probably recent and were formed after the formation of the shelf. Thus, can be related with the last magmatic period at ~3.4 Ma (Geldmacher *et al.*, 2001).

The long period of erosion allowed the development of quadrangular- and U-shaped channels in cross-section. Turbidities are probably the most important downslope erosive flows and can be formed during flank collapses or eruptions. Both processes may have been responsible for the generation of these channel systems.

If we consider 50 to 250 m for the mean depths of the landslide bodies, it is possible to estimate their volumes (between  $525 \times 10^3 \text{ m}^3$  and  $130625 \times 10^3 \text{ m}^3$ ). Some of those landslides are not small but the presence of numerous small scars inside the big ones suggest that they have not occurred as a single event.

The sediment waves at Selvagens are commonly formed at the end of the drainage network, as

reported in others islands of the Madeira Archipelago. They occur immediately after a gradient break, which can cause a hydraulic jump in the currents, originating the sediment waves.

The region where the hydraulic jump occurs, are normally characterized by the presence of coarse sediments. That grain-size variation is observed in backscatter mosaic (Fig. 4). The bands of high intensity are coincident with the higher amplitudes of the seismic reflections. The interpretation of the internal structure (seismic data) suggest a migration of the waves in both directions down- and up-slope. The low vertical inclination and the parallel reflector in seismic reflection data reveal a sedimentation with a strong aggradation (Cartigny *et al.*, 2011)

Scours appear mostly at the base of the insular edifice where the channel system ends and gradients are reduced to 0.5° and 3.0°. This gradient decrease probably causes hydraulic jumps of the flows that dissected the channels, promoting erosion and formation of the scours.

### Acknowledgements

This work is a contribution of SEDMAR program funded by the Portuguese Hydrographic Institute. The authors would like to acknowledge all persons that acquired, processed and realized the analyses of the hydrographic and sedimentary data. RQ acknowledges his research contract as Investigador FCT funded by Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

### REFERENCES

- Geldmacher, J., K. Hoernle, P. van den Bogaard, G. Zankl, and D. Garbe-Schonberg (2001), Earlier history of the  $\geq 70$ -Ma-old Canary hotspot based on the temporal and geochemical evolution of the Selvagen Archipelago and neighboring seamounts in the eastern North Atlantic, *Volcanology and Geothermal Research*, 111(1-4), 55-87.
- Calder, B. R., Mayer, L. A., 2003. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Vol. 4. Number 6.
- Fonseca, L. and Calder, B., 2005. Geocoder: an efficient backscatter map constructor. *Proceedings of the U.S. Hydrographic Conference*, San Diego.
- Cartigny, M. J., Postma, G., van den Berg, J. H., & Mastbergen, D. R. (2011). A comparative study of sediment waves and cyclic steps based on geometries, internal structures and numerical modeling. *Marine Geology*, 280(1-4), 40-56.

## The morphology of Santa Maria Island shelf: Preliminary results from the PLATMAR project

Rui Quartau (1,2), Alessandro Ricchi (3), Ricardo S. Ramalho (2,4,5), João Ventura da Cruz (1), Catarina Fradique (1), André Vinhas (1)

- (1) Divisão de Geologia Marinha, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal. [rui.quartau@hidrografico.pt](mailto:rui.quartau@hidrografico.pt)
- (2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
- (3) University of Bologna, Dip. Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Bologna, Italy
- (4) School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol, UK
- (5) Lamont-Doherty Earth Observatory at Columbia University, New York, USA

**Abstract:** In this work we present the first results from the interpretation of the geophysical data collected around Santa Maria, under the scope of the project PLATMAR. We interpreted multibeam bathymetry and high-resolution seismic reflection profiles to understand which factors have contributed to the present-day morphology of the shelf. This work allowed the recognition of submerged terraces located at approximately -40/-50 m, -70/-80 m, -85/-90 m, -100/-110 m and -120/-140 m. We have also mapped the nature of the seafloor. Rocky surfaces account for ~ 50% of the shelf and sediment thickness is normally less than 2 m. A few larger depocenters occur in places, with sediment thicknesses up to 14 m; these are interpreted to be fault-controlled, with downthrown blocks forming small basins. Several small-scale landslides were also mapped at the shelf edge, probably generated by headward erosion related to canyons systems incising the flanks of the island.

**Key words:** Santa Maria Island, Azores, insular shelf, morphology, marine terraces

### 1. INTRODUCTION

The PLATMAR project aims to improve our understanding of the evolution of Santa Maria Island based on the study of its insular shelf. In 2016, under the scope of this project, high-resolution geophysical data was collected on the insular shelf of Santa Maria, allowing a morphological characterization of the shelf and its relationship with the island's subaerial geological history. Here we present the first preliminary interpretation of the factors controlling the development of the island shelf, in connection with the present-day knowledge of the geological history of the island.

### 2. GEOLOGICAL SETTING

Santa Maria Island lies on the Azores plateau, near the triple junction between the North American, Eurasian and Nubian lithospheric plates (Fig. 1). The island is now considered outside the influence of the diffuse boundary between the Nubian and Eurasian plates. Santa Maria emerged above sea level ~6 Ma ago and was volcanically active until 2.8 Ma ago. It presents a complex history of vertical movements, since it subsided from 6 Ma to 3.5 Ma, when it reversed to uplift, with more than 200 m of vertical displacement (Ramalho *et al.*, 2017).

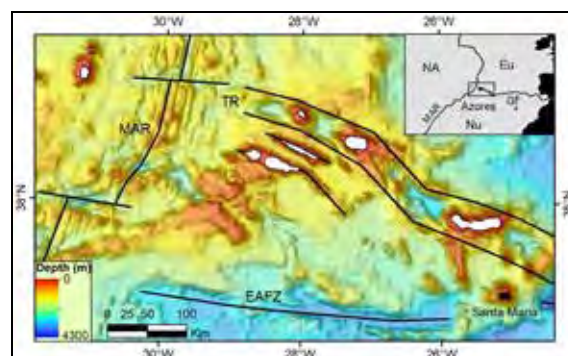


Fig. 1. Regional setting of the Azores Plateau within the triple junction between the American Eurasian and Nubian plates. Black lines represent the tectonic structures of the area. MAR: Mid-Atlantic Ridge; EAFZ: Eastern Azores Fracture Zone; TR: Terceira Rift; GF: Gloria Fault. The bathymetry is derived from the EMODNET web portal (<http://portal.emodnet-bathymetry.eu>).

### 3. DATA AND METHODS

A marine geophysical survey was conducted onboard the R/V *Arquipélago* from 24th August to 15th September 2016 to map the shelf around Santa Maria Island. The survey was carried out between -20 m and -250 m and allowed the collection of multibeam bathymetry and boomer seismic reflection data. The bathymetry was obtained using a pole-mounted Kongsberg EM2040CTM system with an operating frequency range of 200-400 KHz and angular coverage of 130°. Sound speed profiles (yellow dots, Fig. 2) were made during the survey using an AML MinosX Sound Velocity ProfilerTM to correct variations in sound velocity due to

temperature and salinity changes throughout the water column. Data were processed using Caris Hips & Sips 9.0 software to produce high-resolution digital elevation models (DEMs) with variable cells size depending on the water depth (1 m for shallow water to 8 m ~-250 m).

A dense network of 614 high-resolution seismic profiles (Fig. 2) was also acquired using an Applied Acoustic Engineering AA 200 Boomer plate. The receiver array consisted of a single-channel streamer with 8 hydrophones. Seismic survey lines parallel to bathymetry were made concurrently with the multibeam survey, so line spacing varied along depth (between 20 to 200 m), while seismic lines perpendicular to the coastline were spaced ~250 m.

Each seismic line was processed applying the following routines:

- a bandpass filter between 320 Hz and 5600 Hz;
- time variant Gain (TVG);
- a swell filter;
- an AGC filter;
- stacking of traces and;
- water column removal.

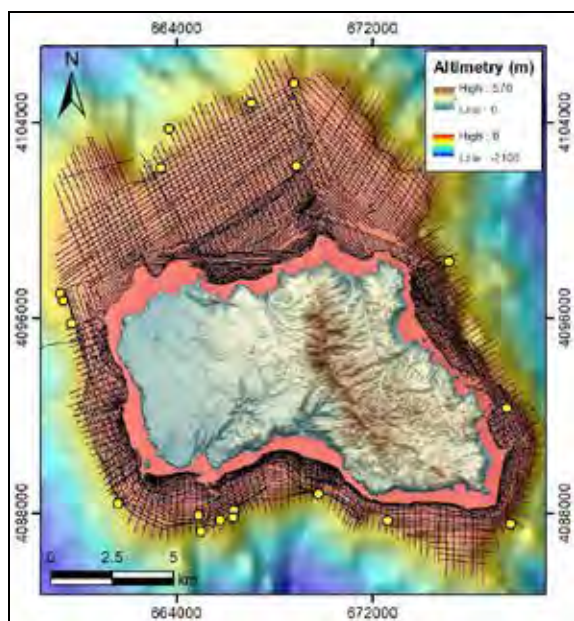


Fig. 2. Dataset used for this study, showing the seismic reflection profiles as black lines. The multibeam survey covered the area shown by the seismic grid and the yellow dots represent location of sound speed profiles. Map in projection UTM 26S.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1. General description of the shelf

The shelf was divided in four different sectors (north, west, south, east), based on their orientation to the dominant wave direction, shelf width and their distinctive morphologies (Fig. 3).

The northern shelf has a roughly trapezoidal shape, exhibiting a different morphology between the eastern and the western sides. The NE side is widest (~8 km) and dominated by numerous concentric structures, which most probably correspond to

truncated cinder cones of the Cabrestantes and Porto Formations, and of the Anjos Volcanic Complex. The NW side of the shelf is narrower (~4-5 km) and its NW-most tip is characterized by an oval-shaped, 200 m-high conical structure (Baixa do Ambrósio) that likely represents the remnants of an old pillow-lava cone. The westernmost portion of the inner shelf is divided in three rocky blocks by sharp and linear escarpments (2 to 2.5 km long, Fig. 4) that are, apparently, the seaward expression of tectonic lineaments recognized on land. The shelf edge depth is constantly below -125 m with maximum depths of ~170 m to the NW.



Fig. 3. High-resolution bathymetry of Santa Maria island shelf. Black lines delimit the shelf sectors considered in this study. Map in projection UTM 26S.

The western shelf runs parallel to the coastline and is generally characterized by a rocky surface with almost no sediment cover. A WNW-ESE strip, probably related to a tectonic feature (Fig. 4) separates the shelf in two parts characterized by different widths (~1 km to the north, ~2 km to the south). In this sector the shelf edge has been significantly affected by mass wasting; where this feature is better preserved, the depth varies between -100/-110 m to -135/-145 m (Fig. 3).

The southern shelf sector has an irregular morphology, with better preserved and wider portions of the shelf alternating with narrower areas affected by gully heads (Fig. 3). Accordingly, the shelf width varies from ~0.7 km to up to ~2.5 km and the edge depth from -80/-90 m to a maximum value of -142 m (Fig. 3). Sharp NNE-SSW oriented lineaments, probably corresponding to the offshore extension of tectonic faults found on land, cut the shelf, often defining rocky structural heights, which are bordered by more depressed areas covered by sediments (Figs. 3 and Fig. 4).

Notwithstanding the fact that clear evidence for tectonic lineaments was not observed there, a similar

setting can be found at the eastern shelf sector, which is generally rocky, with patchy sedimentary cover. Here, the shelf is ~1 to ~2 km wide, while the erosive shelf edge depth is fairly constant, varying between -90 m and -110 m (Fig. 3). Some portions of the shelf are affected by landslides which contributed to decrease the shelf width and the depth of its edge.

#### 4.2. Marine terraces

The onshore portion of the island edifice displays a sequence of raised marine terraces varying between 7-11 m and 210-230 m in elevation, as described in detail in Ramalho et al. (2017). Offshore, we now identified a sequence of submerged marine terraces located at approximately -40/-50 m, -70/-80 m, -85/-90 m, -100/-110 m and -120/-140 m (Fig. 4). Additionally, based on a dated raised terrace and a dated passage zone between submarine and subaerial lava flows, we investigated a possible correlation between the formation of the different raised and submerged terraces with known relative sea-level changes (Fig. 5).

The northern shelf shows the full sequence of submerged terraces and they are also wider (between 400 and 900 m) when compared with those from other sectors. Along the other sectors, terraces are generally much narrower (from <100 m to 500 m) and some of them are even absent (the -100/-110 m and -120/-140 m do not exist at the eastern sector and the -85/-90 m on the western sector).

Our study suggests that both types of terraces were not produced by a single stillstand but rather through the passage of several sea level cycles. The raised marine terraces were probably formed from ~3.5 Ma to ~1 Ma, whilst submerged terraces were formed from ~1 Ma to the Last Glacial Maximum (Fig. 5). The comprehension of the spatial distribution of marine terraces on Santa Maria took into account the complex interplay between glacio-eustatic sea-level fluctuations, the island vertical motion trends, the morphology of the shelf, and the intensity of marine erosion. Our results demonstrate that the development of the raised terraces was a fortuitous conjugation of optimal exposure to energetic waves on the windward side, presence of soft materials, and a suitable arrangement of the stratigraphic units promoting easier erosion. Furthermore, the preservation of these terraces was likely promoted by the uplift rates, which were high enough to allow the consecutive removal of the shore platforms from the action of waves, allowing for their preservation as raised marine terraces. The development and spatial distribution of the submerged terraces was largely influenced by shelf gradient, leading to more developed and preserved terraces in wider and low gradient sectors, as it happened in the northern part of the shelf. Steeper shelf profiles like those of the western, southern and eastern sectors only allowed the occasional generation and/or preservation of

narrower terraces. Shelf sectors subjected to retrogressive erosion of their edges exhibit only poorly developed terraces below -100 m.

#### 4.3. Sedimentary bodies

The insular shelf around Santa Maria is mostly rocky (~50% of the entire area) and the existing sedimentary cover is generally very patchy and thin, being normally less than 2 m thick (Fig. 6). Sediments are mostly restricted to the NW part of the northern shelf and between the eroded cones of the NE part of the northern shelf. The western shelf is mostly rocky and on the southern and eastern shelves sediments are restricted to small basins that are apparently fault-controlled (Figs. 6 and 7). Here, sediments may attain up to 14 m in thickness.

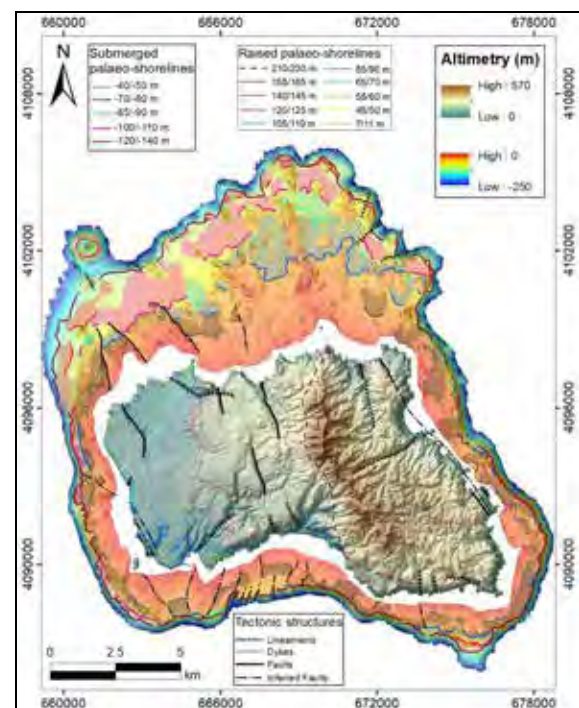


Fig. 4. Map of the mapped terraces on the shelf. Coloured lines offshore correspond to the inner edge of each terrace, whilst the respective coloured adjacent areas to their extension. Coloured lines onshore correspond to the inner edge of the raised terraces. Map in projection UTM 26S.

#### 4.1. Tectonics

Most offshore faults are the continuation of known onshore structures and apparently promote a graben/horst morphology (i.e. with blocks bounded by nearly-vertical faults, downthrown (or elevated) relatively to each other) where sediments are deposited on these structural basins (Figs. 6 and 7). The formation and further development of both raised and submerged terraces appears also to be conditioned by these faults (Fig. 4). According to the chronological attribution of the affected terraces, tectonic activity was present during the 0.693 Ma-2.7 Ma period.

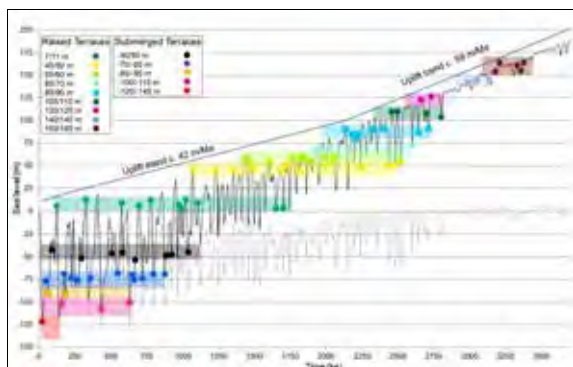


Fig. 5. Tentative correlation between the terraces and their possible timing of formation and subsequent modification within eustatic sea-level oscillations. Coloured horizontal bars represent the admissible time interval during which each terrace might have been carved by marine erosion according to sea-level fluctuations and island uplift. The dots/squares with different colours represent sea-level highstands, lowstands or other stillstands within the respective time frame for each terrace.

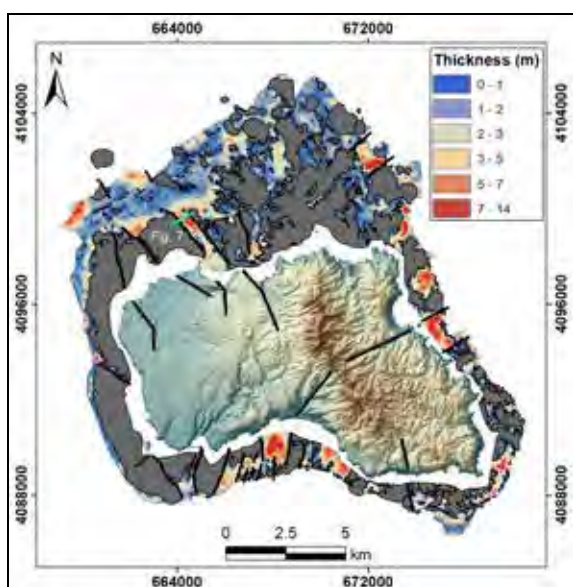


Fig. 6. Map of the rocky outcrops and sediment thickness on the shelf. Light blue line locates seismic profile of Fig. 7. Map in projection UTM 26S.

#### 4.2. Scars at the shelf edge

The entire shelf around Santa Maria is affected by scars at the shelf edge. Scars are larger on the northern and eastern sectors (see Fig. 4). Here, they have normally wide semicircular shapes (1 km wide), whilst on the western and southern sectors they exhibit much smaller dimensions. In particular, those located at the southern shelf edge exhibit an elongated shape, striking NE-SW. These might be related to structural weaknesses of faults and dikes that extend offshore to the south of the island (Fig. 4). Scars at the shelf edge normally consist of heads of individual landslides or heads of canyon systems that dissect the submarine flanks of the island. Given the poor resolution of the bathymetry below -250 m it is difficult to assign them to a single process, but it

appears that most of them are related with canyons incising the flanks of the island.



Fig. 7. Boomer seismic profile showing the structural control of the thickest sediment depocenters. Location of profile in Fig. 6.

## 5. CONCLUSIONS

This study showed for the first time the detailed morphology of Santa Maria Island shelf, allowing for a better understanding of the factors that promoted that morphology. The development of subaerial terraces was essentially controlled by exposure to the energetic regime of the windward side, differential erosion and structural inheritance, under uplift and glacio-eustatic oscillations during the last 3.5 Ma. The distribution and width of the submerged terraces was mainly conditioned by the shelf gradient, i.e., they were better preserved at wider and low gradient sectors. Sediment deposition is mainly concentrated along structural basins that worked as depocenters. Mass-wasting at the shelf edge is probably related to headward erosion of submarine drainage of the flanks.

### Acknowledgements

The acquisition of multibeam bathymetry and seismic reflection profiles was funded by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) through the PLATMAR project (PTDC/GEO-GEO/0051/2014).

## REFERENCES

- Ramalho, R.S., Helffrich, G., Madeira, J., Cosca, M., Thomas, C., Quartau, R., Hipólito, A., Rovere, A., Hearty, P., and Ávila, S.P. (2017). Emergence and evolution of Santa Maria Island (Azores) – The conundrum of uplifted islands revisited. *Geological Society of American Bulletin*, 129, 372-390.
- Vinhas, A. (2018). Projeto PLATMAR: Relatório dos trabalhos de processamento e interpretação sísmica. REL PT03/18. Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal. 19 pp.

# Implementation of a methodology for elemental analysis of sediments based on a handheld X-ray fluorescence analyzer

J. F. Duarte (1), S. Moreira (1) and J. Pombo (1)

(1) Hydrographic Institute – Marine Geology Division – Portuguese Navy; [joao.duarte@hidrografico.pt](mailto:joao.duarte@hidrografico.pt)

**Abstract:** X-ray fluorescence (XRF) is a non-destructive and fast analytical technique, frequently used in environmental studies, geoarchaeology and mining, which allows the determination of elemental concentrations in several materials. In this paper we present the implementation of the analytical method for elemental analysis of sediments using the X-MET7500 analyzer from Oxford Instruments, not only as field handheld device but also as a bench system to be applied in several studies developed in the Hydrographic Institute. This instrument possesses a Rh target X-ray tube (13-45 kV, 10-45  $\mu$ A) and a large area silicon-drift detector that is able to detect elements ranging from Mg to U.

**Key words:** XRF technique, X-Ray, multi-elemental analysis, sediment geochemistry

## 1. OVERVIEW

The X-ray fluorescence (XRF) is a well-established analytical technique for the determination of the elemental composition of several types of materials (e.g. solids, liquids, powders, retained in filters). It has been applied in a routinely way over the last decades in the study of geological samples, once it provides accurate and rapid multi-elemental data, in a non-destructive way or with minimal preparation.

Technological advances over the last 30 years have made possible the development of portable XRF analysers that are nowadays widely used at the field as well as in laboratory facilities.

The Marine Geology Division of Hydrographic Institute had acquired a handheld energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) analyzer, the X-MET7500 from Oxford Instruments, in order to implement a technique for the determination of the chemical elements abundance in sediments. This technique is a powerful tool for obtaining high value data in studies of environmental monitoring or (paleo)environmental evolution. The measurements can be performed on raw samples, during the field collecting process, or over aliquots produced by a simple laboratory pre-treatment process.

## 2. BASIC PRINCIPLES OF ENERGY DISPERSIVE X-RAY FLUORESCENCE SPECTROMETRY (EDXRF)

The principle of the XRF spectrometry is based on the detection of the photonic radiation generated by atom ionization produced by an X-ray source (Fig. 1). When the energy from the source exceeds the absorption edge energy of inner-shell electrons, one or more electrons are ejected. The generated

vacancies are filled by electrons that cascade in from the outer shells, which exhibit higher energy states than those ones in the inner-shell. As the outer-shell electrons cascade down they emit energy in the form of X-rays, also known as fluorescence. The energy of the emitted X-ray photon is dependent on the distribution of electrons in the excited atom. Since every element has a unique electron distribution, every element produces a characteristic radiation, whose intensity is proportional to the concentration of the element in the sample.

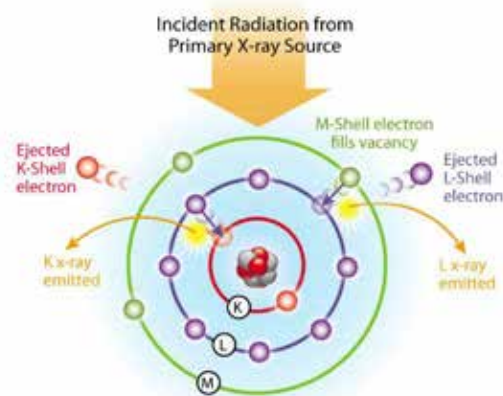


Fig. 1. Schematization of the X-Ray fluorescence process (source: <http://www.thermofisher.com>).

Three electron shells are generally involved in emissions of X-rays during XRF analysis: the K, L, and M shells (Fig. 1). Multiple-intensity peaks are generated from the K, L, or M shell electrons in a typical emission pattern, also called an emission spectrum, for a given element.

The interaction between X-Ray and matter produces not only fluorescence but also two forms of scattering: Compton scatter and Rayleigh scatter (Fig. 2 and 3). The first corresponds to inelastic scattering, where the photon from the X-ray source

suffers an energy decrease caused by direct interaction with resting electrons of the sample atoms, generating a spectrum peak deviated from characteristic radiation of the energy source (for example a Rh tube). The second is generated by elastic scattering (no energy decrease), producing a peak spectrum signature positioned at the energy levels of the target element of the X-ray source (e.g.  $L\alpha$  and  $L\beta$  of Rh). The amount of scattering is mainly affected by (1) the particle size of the sample and (2) average atomic number of the sample. In general, the scattering in solid samples increases with larger particle sizes and lighter matrices.

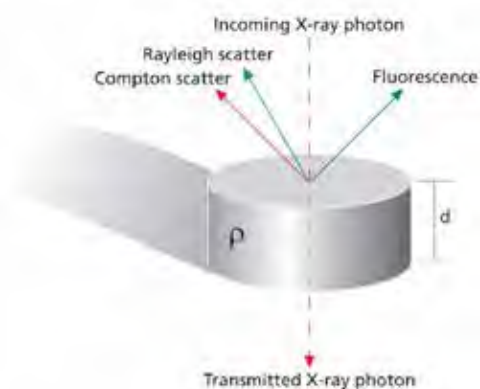


Fig. 2. The interaction result of X-ray and matter;  $d$  – distance;  $\rho$  – density (source: <https://www.malvernanalytical.com/>).

Another type of XRF spectrum signal is the braking radiation, also called *bremsstrahlung* (Fig. 3), a continuous background radiation produced by the sudden stopping, braking or deceleration of electrons around atomic nuclei of the sample elements. Ultimately, part of the X-ray photons can eventually be transmitted through the material and escape on the opposite material boundary (for more details see Oxford Instruments, 2011).

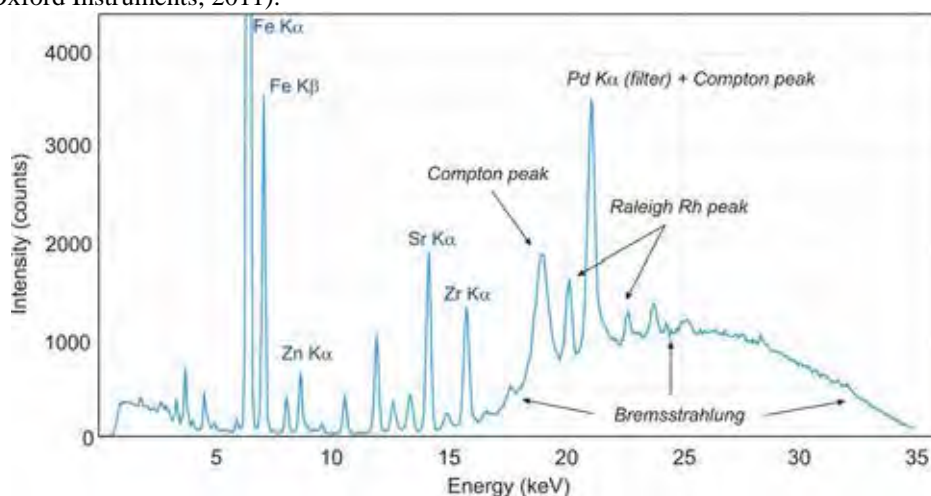


Fig. 3 – Example of a spectrum obtained by the Oxford X-MET7500 analyser. For illustrative purposes a set of elemental peaks were identified (Fe, Zn, Sr and Zr).

### 3. THE EDXRF SPECTROMETRY

In EDXRF all the elements present in the sample are simultaneously excited. The generated fluorescence and scattered radiation are detected and processed by an energy dispersive detector combined with a multichannel analyzer that collects the radiation and separates the different energies of the characteristic radiation of each element, producing an energy/intensity elemental spectrum (Fig. 3).

### 4. SPECTROMETER TECHNICAL OUTLINE

The Oxford X-MET7500 is a handheld EDXRF analyzer (Fig. 4) with the following specifications:

- Silicon Drift Detector (SDD)
- X-Ray source: Rhodium target
- Maximum energy level: 45 kV 50 $\mu$ A
- 5 filters (automatic charger)
- Measurement spot size: 9mm

The equipment manufacturer indicates an elemental analysis range from Mg to U. Nevertheless, at this stage, measurements of Mg content were not easy to obtain due to the difficulty in detecting a clear X-Ray fluorescence signal from light elements, particularly on loose powder aliquots. Light elements generate a weak fluorescence, since the electronic transitions occurs between close orbital levels.

In order to provide quantitative data, this equipment integrates on its software system a set of pre-defined analytical methods based on Fundamental Parameter (FP) calibrations. However, more methods can be configured in order to fulfill other analytical requirements (for more details see item 5.).

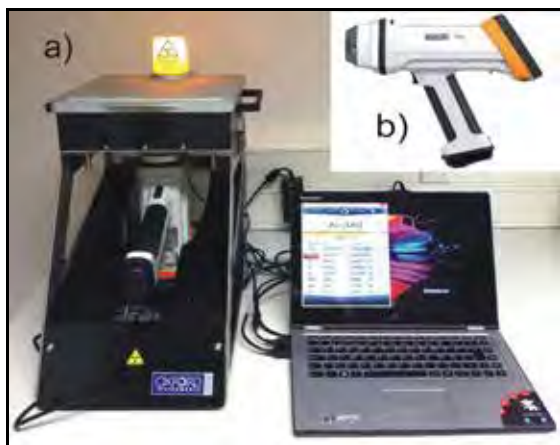


Fig. 4 –Oxford X-MET7500 as a) bench system with PC control, and as b) standalone handheld unit.

Quantitative data can be produced and entirely reported by the X-MET7500, with no additional input actions conducted by the user.

The source/detection head of the handheld unit is equipped with a durable window designed to cope with direct contact with the analyzed sample (sediment surfaces, open cores, or on powder aliquots). In order to avoid water or powder entrance and contamination on the analyzer head, the measured object surfaces are usually covered by an XRF polypropylene film, suitable for this type of technique, considering its high percentage transmittance for the lighter elements.

The equipment can also be assembled in a bench system that provides an easy and secure way to measure pre-treated aliquots (Fig. 4).

## 5. TYPES OF XRF DATA

In XRF technique the delivered raw data is the number of photons per unit time, expressed as peak intensity or count rate for the correspondent energy of the light fluorescence emitted by every single element. This not only shows the presence of each element but also provides its abundance, since fluorescence intensity is directly proportional to the number of ionized atoms. Graphical visualization of the spectrum exhibits peaks of detection counts for each element-specific fluorescent energies (Fig. 3). Therefore, as more counts are obtained for a given particular energy level, the higher the corresponding elemental content will be.

Qualitative, quantitative and semi-quantitative data are thereby produced. The qualitative data are obtained directly from the examination of the raw spectrum, once it informs which elements are present in a sample, but does not contain information regarding how much of each element is present unless further processing. If two similar samples are

analyzed with exactly the same measurement analytical conditions (e.g. time, energy, and filter) for a certain element, the one with a higher peak contains more abundance of this element.

Semi-quantitative data processing allows the user to compare spectral data in order to obtain results regarding the relative concentrations of elements from sample to sample. This method does not provide absolute concentration values, but can be used to ascertain relative element concentrations between samples. For instance, in a split corer, the count measurement over each centimeter gives the relative variation of an element throughout the sediment column. The count values of individual elements can be compared within the set of all core level measurements, and be expressed as counts, or even percentages; as an exemplification, sample “core level A contains approximately 20% more Sr (strontium) than core level B.” This approach is useful in situations where a calibration is not possible to obtain, but the relative variation of elements constitutes a valuable information.

Quantitative data informs the user the absolute concentration of an element present in a sample, usually in  $\text{mg kg}^{-1}$  (equivalent to parts per million) or weight percentage. In order to transform raw qualitative data into quantitative data a calibration must be produced. In the X-MET7500 the calibration can be done using a fundamental parameter (FP) approach or an empirical quantification procedure.

The FP calibration is based on mathematical models defined by Sherman (1955) that describe the intensity of an element and the composition of a sample. The model constants are obtained by measuring pure substances of each element, generally in metallic form. This calibration is usually suited for alloy samples but it can also produce reliable results in other type of matrices, especially if a careful aliquot pre-treatment takes place (fine homogeneous powder, pressed pellets or fused beads).

Empirical calibrations require the measurement of a set of standard substances, usually Certified Reference Materials (CRMs), to produce a regression model that relates the reference concentrations and the instrumental intensity areas defined under the element spectral peaks of each element. The chosen CRMs should have a similar matrix than the samples, and their elemental concentrations should cover all the expected concentrations.

This quantification approach is the most reliable for specific type of matrices (CRM's and samples) with a wide range of elements, provided that the measurement instrumental settings (time, energy level, power and filter) are constant for each element



and the pre-treatment process, aliquot form (e.g. loose fine powder) and sample holder are equal.

## 6. METHOD IMPLEMENTATION

The X-MET7500 integrates a set of predefined FP calibration methods designed for mining exploitation (Mining mode) and environmental monitoring (Soil mode).

The empirical calibration methods for marine/estuarine/riverine sediments are currently in implementation process. Nevertheless, it was verified that the SOIL\_2COND mode, designed for metal screening in soil matrices, was able to retrieve reliable data for a set of elements on a group of CRMs of marine, estuarine and stream sediments (Tab. I and Fig. 5). This is expressed by the relation between certified and measured concentrations of Fe, K, Mn, and Zn, which exhibit a very high predictability, reflected by coefficients of determination ( $R^2$ ) above or equal to 0.99 (Fig. 5).

Tab. I – Certified Reference Materials used to test the FP calibration method SOIL\_2COND; NRCC – National Research Council Canada; NIST – National Institute of Standards and Technology; NCS - NCS Technology Co., Ltd.

Ref.	Type of sediment	Lab.	K (%)	Fe (%)	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
PACS-3	marine	NRCC	1.24	4.11	425	379
MESS-4	marine	NRCC	2.38	3.79	298	147
SRM 1646a	estuarine	NIST	0.86	2.01	235	49
NCS DC 73307	stream	NCS	1.65	3.40	620	78

Although experimental calibrations were not yet undertaken, this linear model adjustment can be used in a contingently way to produce preliminary quantitative results, considering the remarkable correlation between certified and measured elemental concentrations. In the case of Zn, the line slope is near 1 and the intercept value is low, near zero.

## 7. APPLICATION IN ONGOING STUDIES

The aforementioned method was applied to the elemental analysis of superficial samples from the western seafloor of Madeira Island, assuming the acceptable reliability of its results. Each sample was grinded in a planetary mill and in a mortar mill successively, in order to obtain a fine powder with similar grain-size of the CRMs. The dried powder was packed in plastic cups, which were sealed with polypropylene thin film (Fig. 6). Each measurement session was preceded and followed by a control measurement of both PACS3 and NCS DC 73307 CRMs (Table I). For the mentioned elements the analytical error was lower than 10%. In this application example, the elemental concentrations allowed the differentiation of distinct sedimentary

deposits, based on the predominance of biogenic or terrigenous elements. Moreover, it was possible to detect a high similarity between the terrigenous component of the sediments and the lithologies outcropping on the subaerial island, based on data reported in the literature.

A semi-quantitative approach was also developed, based on the spectral count values for each element, measured above background. The count values are obtained from the raw data of the spectra exported from the X-MET7500 as ASCII format files. In this method, two X-Ray source energy and power levels were applied for two different elemental ranges: 13keV/45µA for the Na to Ni range (atomic numbers from 11 to 28) and 45keV/10µA for the Cu to Sn range (atomic numbers from 29 to 50).

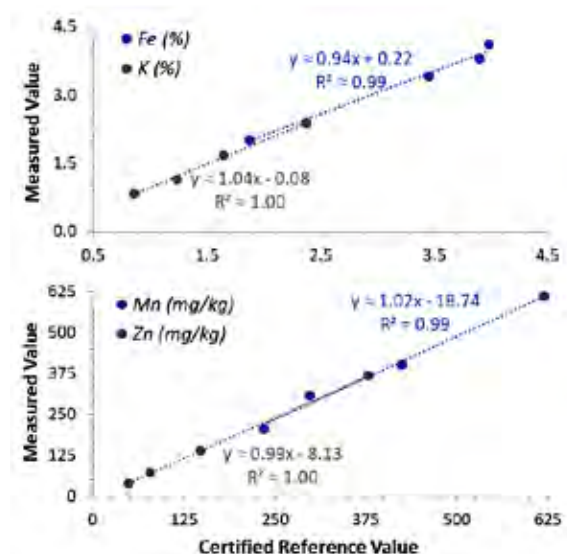


Fig. 5 – Correlation between certified content values and concentration results obtained using the SOIL\_2COND for K, Fe Mn and Zn elements.

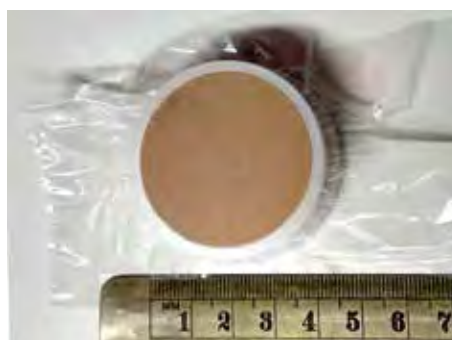


Fig. 6 – Sample cup used to pack the sample grinded powder.

## REFERENCES

- Sherman, J. (1955) - The theoretical derivation of fluorescent X-ray intensities from mixtures. *Spectrochimica Acta*, volume 7, 283-306.
- Oxford Instruments (2011) – X-MET7000 series Calibration Manual, 5102 971-4VE/1.10, 81p.

# Variações morfológicas recentes da zona submersa do Portinho da Arrábida

L. Rebêlo (1) e S. Nave (1)

(1) Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Estrada da Portela. Zambujal. Apt7586 2610-999 Amadora. luis.rebello@lneg.pt.

**Resumo:** A praia da baía do Portinho da Arrábida tem sofrido alterações morfológicas significativas desde o início do século passado, traduzidas numa diminuição acentuada, da dimensão do seu areal. A diminuição da praia está certamente ligada às alterações que ocorreram no fundo marinho e, embora as modificações na superfície do delta tenham sido já descritas por vários autores, as variações morfológicas recentes no interior da baía do portinho são ainda desconhecidas.

Com este trabalho pretende dar-se um contributo para o conhecimento dos processos sedimentares associados à praia do Portinho da Arrábida, apresentando o resultado da comparação de dois levantamentos batimétricos, efectuados no interior da baía. Tendo em consideração as limitações dos dados existentes, serão apontadas as principais alterações detectadas e discutidas as suas associações aos padrões de circulação sedimentar que, de alguma forma, consubstanciem o desaparecimento da areia.

**Palavras-chave:** Portinho da Arrábida, erosão costeira, delta do Sado, sedimentos, morfologia.

## 1. INTRODUÇÃO

A baía do Portinho da Arrábida tem sido alvo de grande atenção nos últimos anos devido a alterações significativas verificadas na dimensão da praia, cujo comprimento está reduzido a 37% e a sua área a 43% do valor que outrora apresentaram (Rebêlo e Nave, *accepted*).

A baía do Portinho da Arrábida está enquadrada, na parte continental, por uma imponente vertente talhada na Serra da Arrábida e, pela parte marinha, pela planura submarina formada pelo delta do rio Sado. O setor costeiro onde se insere a baía tem uma orientação aproximadamente SW-NE, sendo que a forma da baía parece ser condicionada pela litologia das rochas existentes. A linha de costa apresenta uma forma em arco, com uma orientação, no lado oeste, aproximadamente N-S e, no lado leste, aproximadamente W-E. A existência de dois promontórios rochosos salientes, nos extremos da baía, indicia processos de erosão diferencial na evolução costeira local. Relativamente ao setor marinho, a baía do Portinho insere-se na zona costeira que contacta com o bordo norte do delta externo do rio Sado, um corpo sedimentar de grandes dimensões. Não obstante a superfície do delta poder ser classificada como uma zona aplanada, se analisada a uma escala mais detalhada verifica-se que a mesma apresenta uma série de canais e dunas submersas.

Neste contexto geomorfológico, os principais agentes forçadores da dinâmica sedimentar local e das variações da zona costeira observadas no último século, são a ondulação e as correntes de maré. A orientação da costa entre o Cabo Espichel e o delta do Sado (aproximadamente W-E) tem como

consequência que esse setor fica em zona de sombra relativamente à ondulação de NW, fazendo com que este troço costeiro seja sempre atuado por ondas com rumos para sul do oeste, independentemente da orientação da ondulação ao largo (Andrade et al., 2006 in Brito, 2009). No Portinho, o efeito de sombra é ainda mais acentuado devido à orientação da baía (WSW-ENE). Assim, e embora os temporais de W e SW sejam menos frequentes que os de NW, estes acabam por ter um maior impacto na praia, devido à maior exposição da baía a esses rumos. No domínio externo do estuário, o campo de correntes residuais é dominado por um forte jato de vazante ao longo do canal de acesso ao estuário e por dois vórtices adjacentes sobre os bancos arenosos da Figueirinha e do Cambalhão, com sentidos anticiclónico e ciclónico, respetivamente (Brito, 2009). Ainda de acordo com Brito, 2009, as correntes residuais associadas ao modelo de circulação tridimensional podem ter papel significativo na morfologia do delta e estar na origem do abruto talude terminal do delta exterior.

As caracterizações da dinâmica sedimentar, efectuadas no passado, incidem sobretudo nos processos deltaicos (Brito & Rebêlo, 2013, Carneiro, 2013), e são assentes em modelos teóricos, tendo as correntes de maré como principal agente forçador. A existência dos canais e dunas submersas sobre a superfície do delta, anteriormente referidos, em constante evolução espacial, conferem aos fundos, junto ao Portinho, uma dinâmica complexa e ainda desconhecida (Brito, 2009). O modelo de circulação sedimentar para o bordo norte do delta externo do Sado aponta para que o sedimento seja movido ao longo do canal principal, no sentido *onshore-offshore*, e que, seguindo os vórtices das correntes

residuais atrás mencionados, reentre na circulação, migrando sobre a superfície do delta no sentido *offshore-onshore*. É associado a este processo que se assume a existência das dunas submarinas ao largo do Portinho.

Pela proximidade e pela continuidade morfológica existente entre os dois domínios (praia e delta), assume-se que o delta funciona como fonte de sedimento para a deriva litoral local e é responsável pela formação de várias praias, além da do Portinho, as praias de Alpertuche, Coelho, Galapinhos, Galápos e Figueirinha, esta última já fortemente condicionada pela introdução de um esporão. Indicadores geológicos apontam para que as variações na quantidade de areia na praia do Portinho possam ser encaradas como um fenómeno natural. No entanto, e devido à estreita ligação da praia com o delta do rio Sado, as ações de fixação, e de dragagem, do canal de navegação, ao promoverem alterações na dinâmica do delta, poderão ter impactos negativos no sistema de praia.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise da variação dos fundos contíguos à baía do Portinho foram utilizados dois conjuntos de dados batimétricos, obtidos, respectivamente, em 1995 e em 2011, com o intuito de elaborar dois Modelos Digitais de Terreno (MDT). A comparação dos dois MDT foi usada para analisar a variação da superfície do fundo e concluir quanto às alterações ocorridas. Devido à elevada transparência da água e à pequena profundidade da área em análise (fundos maioritariamente acima dos -15 m NMM), foi igualmente utilizada uma fotografia aérea de 2013 para complementar a caracterização das formas de fundo existentes.

Os dados da batimetria de 1995, cedidos pelo Instituto da Conservação da Natureza, são resultantes de um levantamento batimétrico, efectuado pela HIDRODATA, entre Março e Junho de 1995, e representados à escala 1:5000. A cobertura de sondas apresenta fiadas com aproximadamente 50 metros de intervalo, com um espaçamento entre pontos variável, mas geralmente inferior a 20 metros (figura 1). O mapa original, representado com base no sistema de Projecção de *Hayford Gauss* e Datum de Lisboa, foi georreferenciado utilizando o cruzamento dos fios dos retículos existentes e transformado para ETRS84-TM06. Posteriormente foram digitalizados os pontos referentes às sondas de profundidade, obtendo-se assim o conjunto de dados de batimetria para a elaboração do MDT. Este foi realizado utilizando o método de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted*).

Os dados referentes a 2011 foram adquiridos com tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging), tendo proveniência na Direcção Geral do Território e autoria da Agência Portuguesa do Ambiente (APA,

I. P. e DGT) (<http://www.dgterritorio.pt/>). Os dados cobrem uma faixa de cerca de 1 000 m de largura, apresentando-se 400m no setor terrestre (resolução de 1 m) e 600 m no mar (resolução de 2 m).

O processo de georreferenciação, digitalização, criação de MDT e comparação de superfícies foi produzido em ambiente GIS, utilizando o software da ESRI, ArcMap 10.4.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de dados de 1995 abarca a zona costeira entre a Figueirinha e Alpertuche, desenvolvendo-se até à proximidade do canal de vazante, embora esta estrutura morfológica não esteja abrangida pelo levantamento (figura 1).

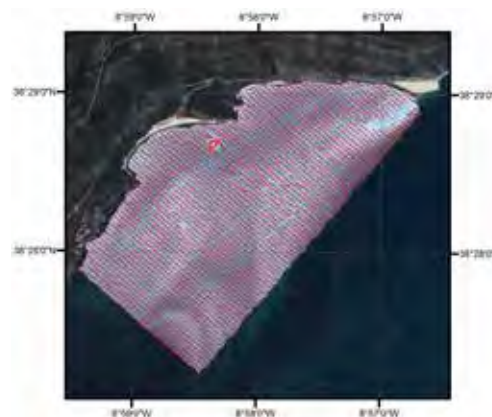


Fig. 1. Representação da localização dos pontos da batimetria de 1995 e respectivo MDT, sobre ortofotomapa da DGT de 2012.

A cobertura LiDAR de 2011 abarca uma área menor, devido a se restringir a uma faixa de 600m sobre a água (figura 2).

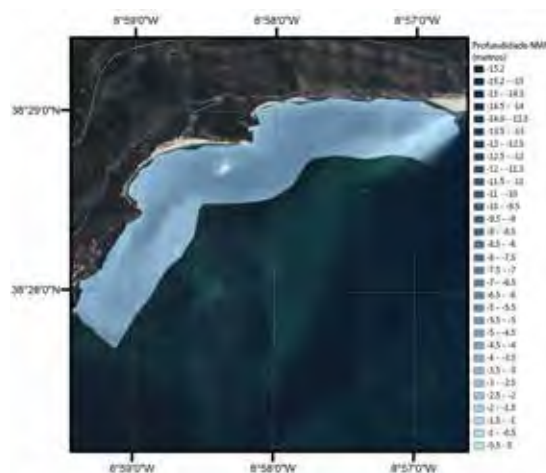


Fig. 2. MDT referente aos dados LiDAR, sobre ortofotomapa da DGT de 2012. A legenda das profundidades aplica-se igualmente ao DTM da figura 1.

A análise conjunta do MDT de 1995 e da fotografia aérea de 2003 permitiu observar formas de fundo que fornecem indicações sobre o transporte sedimentar (figura 3).

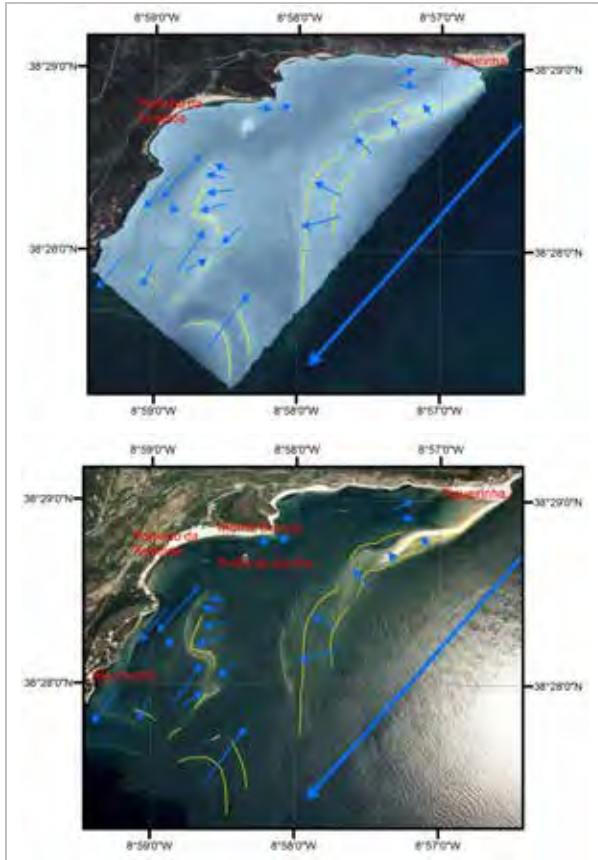


Fig. 3. Formas de fundo e transporte sedimentar inferido. Linhas a amarelo representando o topo dos relevos submarinos (as mais espessas extraídas do MDT de 1995, na imagem de cima, e mais finas, da fotografia aérea de 2003, na imagem de baixo). As setas a azul representam a interpretação efectuada relativamente ao sentido do transporte sedimentar. A seta mais espessa, a leste, representa o canal de vazante.

As principais estruturas observáveis correspondem à barra linear marginal, localizada paralelamente ao canal de vazante, junto à Figueirinha; *ramp-margin shoals* (bancos de areia associados à rampa que margina o canal de vazante); e estruturas sobre a plataforma de espalho do delta (dunas submarinas), de forma complexa, relacionadas com a interacção entre as marés, que terão provavelmente tido origem na segmentação de antigos *ramp margin shoals*.

O resultado da diferença entre os dois DTM's (1995 e 2011), efectuado na área abrangida pelo levantamento LiDAR, por apenas aí ser possível fazer a sobreposição das duas superfícies disponíveis, mostra uma variação significativa da morfologia de fundo concentrada em pequenas áreas (figura 4).

A sul da Praia dos Pilotos verifica-se ocorrer uma acumulação alongada (figura 5, 2), no enfiamento do canal que separa a duna anteriormente referida (figura 5, 1) e a costa. Esta acumulação poderá ser consequência indirecta do aumento da corrente devido ao estreitamento do canal que provoca erosão entre a base da duna e a costa, depositando o sedimento, mais a sul, na zona em que a morfologia se torna mais aberta.

Os locais onde estas variações ocorrem estão de acordo com o transporte sedimentar inferido através da análise morfológica referida anteriormente (figura 3), o que corrobora a avaliação efectuada.

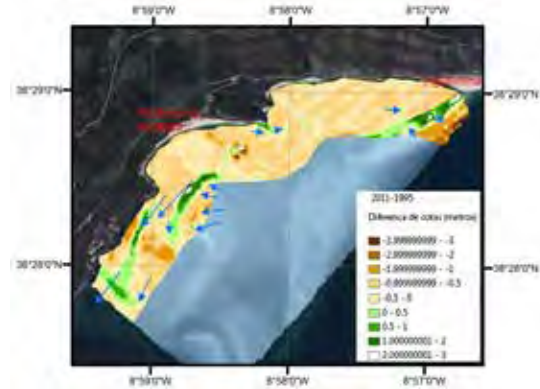


Fig. 4. Resultado da subtracção dos dois DTM's, colocando em evidência os locais onde ocorreram maiores alterações nas formas de fundo. As setas a azul correspondem ao transporte sedimentar inferido e representado na figura 3.

A observação do mapa de variações na zona mais próxima do Portinho da Arrábida evidencia um deslocamento da duna submarina, localizada ao largo da baía, em direcção a terra (figura 5, 1), com um valor máximo de 120 m, de 1995 a 2011.

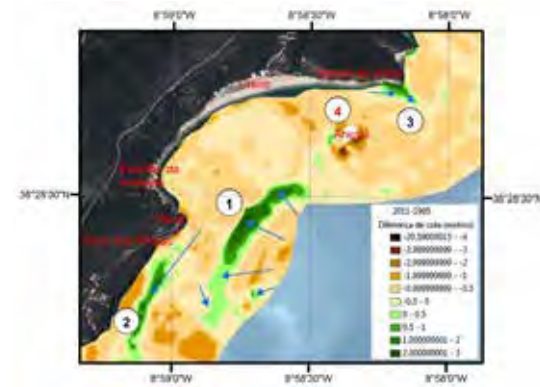


Fig. 5. Detalhe do resultado da subtracção dos dois DTM's, colocando em evidência os locais onde ocorreram maiores alterações nas formas de fundo. As setas a azul correspondem ao transporte sedimentar verificado por comparação dos dois DTM's. Números a negro indicam zonas de acreção e a vermelho, de erosão.

A erosão verificada à frente do Creiro e na zona entre a Anicha e a costa (figura 5, 4), com a diminuição da expressão morfológica do tómbolo submarino que aí se verifica, poderá ser responsável pelo estreitamento da praia nesse local, que levou ao desaparecimento do *Monte de Areia* verificado na primeira década deste século (Rebêlo e Nave, *accepted*). A ocorrência de erosão verificada ao largo da praia de Alpertuche ("mancha" a leste do símbolo 2, da figura 5) está igualmente em consonância com o padrão de transporte sedimentar inferido e apresentado nas figuras 3 e 4, bem como com o eventual incremento da velocidade da corrente nesse local devido à acumulação verificada mais a oeste (figura 5, 2)

A acumulação verificada no extremo este da baía (figura 5, 3) parece ser consequência da erosão ocorrida na zona do *Monte de Areia*, em frente à Anicha, com a deslocação da areia para o largo, sob a forma de restinga submersa.

A análise geral do mapa das diferenças (figura 4) indica que terá havido uma erosão quase generalizada de todo o fundo, facto assinalado pela dominância da cor castanha. No entanto, devido à generalização dessa tendência, julga-se que o resultado obtido poderá estar relacionado com diferenças nos referenciais dos dois conjuntos de dados. Assim sendo, não se considera adequado, utilizando estes dados, efectuar cálculos volumétricos das variações ocorridas nem indicar valores absolutos de variação dos fundos para locais específicos. No entanto, embora as variações morfológicas significativas atrás descritas (figura 5), devam ser lidas com prudência em termos de valores quantitativos, podem ser interpretadas como variações qualitativas e reais do sistema. Não obstante a dúvida levantada sobre a erosão generalizada poder estar relacionada com as diferenças nos referenciais dos dois conjuntos de dados apresentados, julga-se pertinente mencionar a análise realizada por Brito (Brito, 2009). Esta análise, relativa à evolução dos fundos entre 1930 e 1961, que embora efectuada com base na comparação de mapas históricos de pequena escala, aponta também para uma erosão generalizada no fundo da baía. Aí, a excepção relaciona-se com a acumulação verificada entre a Anicha e a linha de costa (figura 6), levando ao desenvolvimento de um tómbolo submarino.

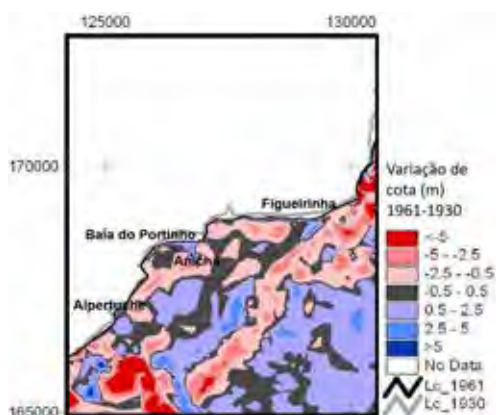


Fig. 6. Variação da cota de fundo por comparação dos modelos digitais de elevação de 1961 e 1930 (adaptado de Brito, 2009).

Esta acumulação emersa deverá estar na origem da maior largura da praia na zona do *Monte de Areia* que aí existiu até ao início do presente século, o que permitiu a formação da famosa *climbing dune*. A análise evolutiva agora efectuada, que aponta para uma erosão do fundo nesta área, concomitantemente com o desaparecimento da duna, aponta para a existência de uma relação causa/efeito entre este relevo submarino e a formação da duna no extremo leste da baía.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apontam para uma migração *onshore* de 120 m, entre 1995 e 2011, do banco de areia localizado entre o forte do Portinho e a Pedra da Anicha, estreitando o canal que separa essa estrutura e a costa. O aprofundamento e estreitamento desse canal e a deposição de sedimento a sul, apontam para uma menor disponibilidade sedimentar junto ao Cabo onde se localiza o forte (o início da baía do Portinho) e são um indicador de que o transporte resultante, nessa área, será maioritariamente de NNE para SSW.

No extremo oposto da baía, a diminuição do relevo submarino perpendicular à costa, que une a Pedra da Anicha à zona do antigo *Monte de Areia*, interpretado como sendo um tómbolo submerso, deverá estar na origem do estreitamento da praia verificado e consequente desaparecimento da duna nessa zona. A acumulação, em forma de restinga submersa, ocorrida para leste dessa área, na continuação do cabo que delimita a baía, poderá ser entendida como tendo sido formada a partir da areia do tómbolo, indicando, assim, que nessa zona, o transporte resultante será de W para E.

#### Agradecimentos

Ao ICNF, na pessoa do Dr. Miguel Henriques, pela disponibilização da batimetria de 1995, sem a qual não teria sido possível realizar este trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- Andrade, C.; Freitas, M.C.; Brito, P.; Amorim, A.; Barata, A.; Cabaço, G. (2006). Estudo de caso da região do Sado, zonas costeiras. En: F.D. Santos e P. Miranda (eds.). *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II*, Gradiva, Lisboa, 385-479.
- Brito, P. (2009). *Impactos da elevação do nível médio do mar em ambientes costeiros - O caso do estuário do Sado. Dissertação de Doutoramento em Geologia*. Univ. de Lisboa, 344pp.
- Brito, P.; Rebêlo, L. (2013). Geologia do Portinho da Arrábida. En: *Desassoreamento da Arrábida – Causas e soluções. Atas do colóquio, 16 de Novembro de 2011*. Estrutura de Missão para os Assuntos do Mar, Lisboa, 49-66.
- Carneiro, E. (2013). Portinho da Arrábida, Areias “Viajantes”; Causas Naturais ou Artificiais. *Atas do colóquio, 16 de Novembro de 2011*. Estrutura de Missão para os Assuntos do Mar, Lisboa, 73-89.
- Rebêlo, L. e S. Nave (*Accepted*). Evolução recente da baía do Portinho da Arrábida: Contributos da geologia para uma correta gestão ambiental. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*.

# REVIEW ON THE APPLICATION OF GEOSTATISTICAL TECHNIQUES TO PREDICT MARITIME VARIABLES

M. Pinheiro (1), T. Miranda (1), E. Pereira (1), I. Valente (1), F. Cruz (1), D. Maslov (1)

(1) Department of Civil Engineering, ISISE; University of Minho, Guimarães, Portugal;  
marisamotapinheiro@gmail.com

**Abstract:** The effect of all human activities in marine and coastal ecosystems, including pollution, depleted fisheries, and marine biodiversity, is insufficiently assessed. As such, it is widely recognized that there is an evident lack of information which must be tackled immediately. Part of the problem should be addressed by increasing monitoring. However, considering the vast areas to cover and characterize, as well as the amount of information generated, innovative approaches are required to increase knowledge about the ecosystem variables and effectively support the decision process, so that a more sustainable exploitation of marine resources can be reached. Geostatistics may represent an interesting approach to consider, giving that promising results have been obtained with the technique in other domains, such as the ones related to mining and the characterization of rock masses. The kriging estimation techniques can be used to predict the values of maritime variables at any specific location, based on the information available at the neighbouring locations and on the spatial correlation structure of the variables random fields. This paper is dedicated to the critical analysis and review of the existing works which already include geostatistics prediction techniques to produce sediments maps of sea and ocean bottoms and other maritime variables.

**Key words:** geostatistics, marine environment characterization, sediment grain size maps characterization, maritime variables prediction.

## 1. INTRODUCTION

The existing information about maritime ecosystems is in general very limited, mostly due to accessibility and economic constraints, and also due to the high level of heterogeneity of the physical and biological variables involved. As a consequence, sampling data recovered from the monitoring systems is sparse and reduced, and the interpolation techniques commonly used to accurately map the maritime variables often show limitations. There is an increasing need to investigate more robust techniques to characterize and produce prediction maps of the maritime variables using reduced amounts of sampling data. Geostatistics may represent an interesting approach to consider, giving that promising results have been obtained with the technique in other domains, such as the ones related to mining and the characterization of rock masses. The kriging estimation techniques can be used to predict the values of maritime variables at any specific location, based on the information available at the neighboring locations and on the spatial correlation structure of the variables random fields. The main objective of this research is to evaluate the current importance of geostatistical techniques on the characterization of sea bottoms.

## 2. MARITIME VARIABLES – SEDIMENTS

A relevant number of works applied a geostatistical technique, namely estimation, to produce sediment maps of sea and ocean bottoms. The work of Jerosch *et al.* (2006) should be highlighted, mostly due to the large amount of data used in its study. Jerosch *et al.* (2006) used information of the Beaufort Shelf (in the Canadian Arctic) grain size from 1969 to 2008. Four types of sediments were considered, gravel, sand, silt and clay, as well as their size, to develop a predictive multi-parametric sediment map. As a result, percentage maps were obtained for all four sediment types, all in the same predefined grid used to characterize the mentioned area. These maps indicate the probability (from 0 to 100) to find each of the sediments type. Then, and through the combination of external variables such as bathymetry, cost, distance and slope (all estimated using kriging) the author was able to build a final map of sediment type using as reference the classification proposed by Shepard (1954). As a conclusion, the author stated that kriging provided superior interpolation results for clay and sand when compared to cokriging that used bathymetry and slope as secondary variables. The work also mentions the suitability of the technique to deal with a limited number of samples and their heterogeneous spatial distributions. This type of sediment type maps can be very useful for benthic ecosystems

mapping, as well as to understand the sedimentology deposition.

In the same domain, Meiliand *et al.* (2011) used cokriging estimator, assuming bathymetry as secondary variable, to estimate the grain size in a nearshore area in front of the Spiekeroog Barrier Island at the southern North Sea of Germany (Fig. 1a). As a result, a median grain-size map with Root Mean Squared Error (RMSE) values of 0.073 mm was obtained. Considering that the range of the grain size varies between 0.12 mm and 1.071 mm an error of 0.073 mm can be interpreted as residual (Fig. 1b). The obtained maps can also be used to withdraw some conclusions regarding the sediments depositions, since seaward flanks mean finest sediments and coarsest sediments are located in landward flanks. In 2009, Verfaillie *et al.* tried a different approach and added a preliminary step based on Principal Component Analysis (PCA) with the aim to choose the secondary variables that could improve the silt-clay % estimation. The tested variables were the ones that showed correlation with the sediment percentages, namely slope, eastness, northness, profile curvature and bathymetry. In addition, two types of kriging were tested, the ordinary cokriging and cokriging with external drift, being the latter the one that resulted in lower RMSE values in all the three computed maps, there is ds10 (10<sup>th</sup> percentile of the sand fraction), ds50 (median grain-size of the size fraction) and ds90 (90<sup>th</sup> percentile of the sand fraction). Fig. 2 presents the estimation map for both kriging types and it is possible to observe that the Kernel with External Drift (KED) grain size map shows a higher variability with more zones with larger grain sizes. This goes in line with the validation results, where the linear regression between the true and the estimated grain size values for KED presented a larger range of values in the points cloud. This can possibly be justified by the residual random function added to KED compared to OK (Ordinary Kriging). In a previous work, the same authors stated that kriging techniques are the most promising tools to obtain detailed and high quality maps for the median grain-size distribution.

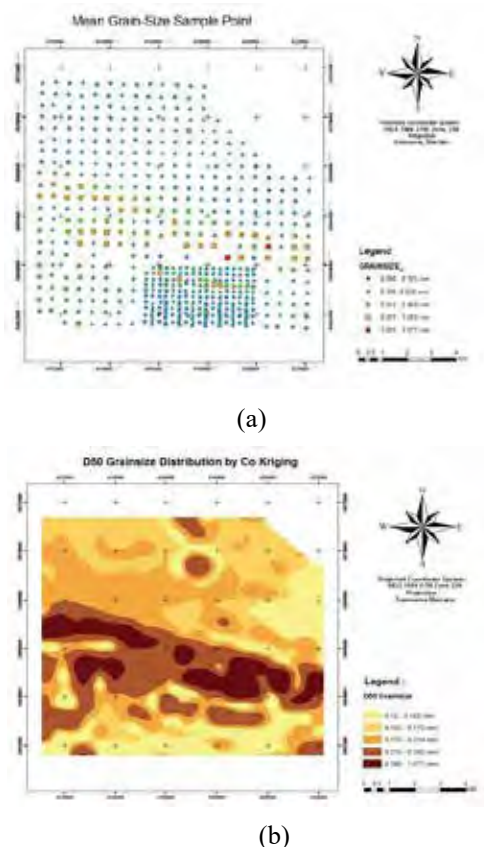
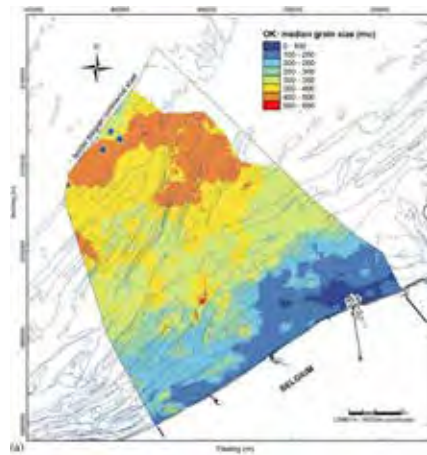
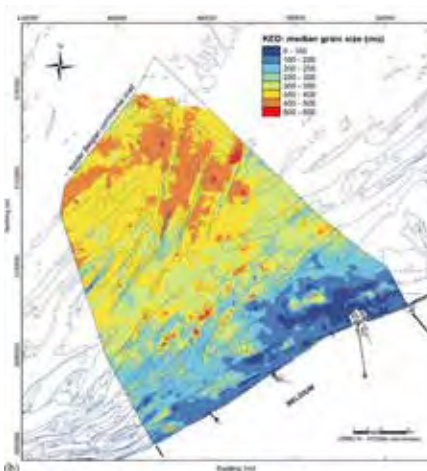


Fig. 1. Estimation median grain-size results for: a) the initial data set used in the study; b) cokriging interpolation (Meiliand *et al.*, 2011).



(a)



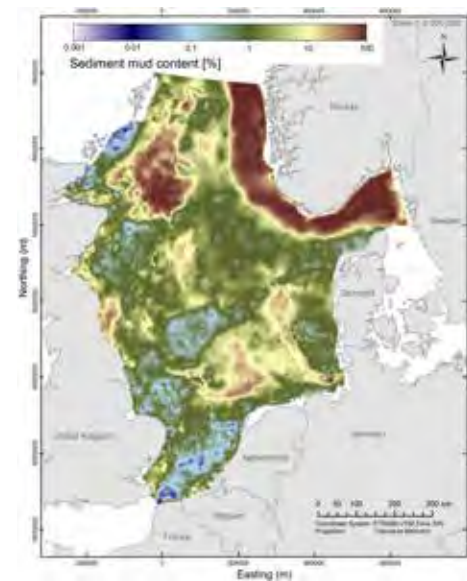
(b)

Fig. 2. Sedimentology maps based on two types of kriging: a) ordinary kriging; and b) kriging with external drift (Verfaillie *et al.*, 2009).

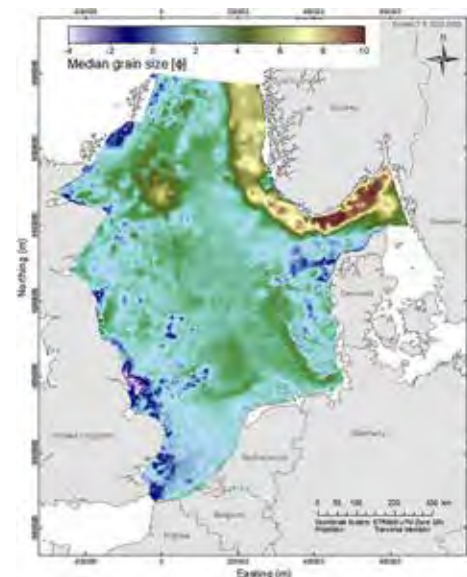
In similar fields, Diesing *et al.* (2014) applied other interpolation techniques besides geostatistics to map seabed sediments. Among the three main tested methods, object-based image analysis, random forest and geostatistics, the last was the one that resulted in lower error values, proving once again that these techniques are suitable to predict maritime variables. The work was performed with data from the western North Sea of the Scottish coast of the United Kingdom and was composed by 185 seabed sediment samples. The comparison made between the obtained maps and the one obtained from geostatistics showed a much better agreement between the real data and the results of the geostatistical model. In contrast to the remaining techniques, the geostatistical estimation map did not take into account the acoustic data.

A more recent work by Bockelmann *et al.* (2018) uses the KED type of kriging to estimate the median grain-size and mud percentage in the North Sea. In order to understand the advantages of KED in relation to other interpolation techniques, the authors calculated the errors of the median grain-size

estimation using OK, KED, LR (Linear regression) and IDW (Inverse distance weighting). All kriging techniques showed error values which were lower or equal to 4.9, while the classical techniques (LR and IDW) resulted in error values higher than 10. Between the kriging techniques the differences were almost imperceptible (if compared all errors and goodness' of fit); however, the authors highlighted the realistic benefit that a KED approach brings to the estimation since secondary information is used and helps to explain abrupt changes in the estimated values (justified by the non-linearity of variables relationship). Fig. 3 displays both variables maps, mud % and median grain-size distributions, where it is possible to observe that the largest grains are present in zones where the mud percentages are also higher.



(a)



(b)

Fig. 3. North Sea predicted maps using KED for: a) mud%; and b) median grain-size using mud% as secondary variable (Bockelmann *et al.*, 2018).



### 3. FINAL CONSIDERATIONS

In this research a selection of geostatistical applications to model sea sediments was analyzed. The publications were selected and compared regarding: i) the applied technique; ii) preliminary data available to support the models; and iii) the main withdrawn conclusions. It was possible to conclude that bottom sediments can be appropriately addressed and described using geostatistical techniques, both in coastal and offshore areas. However, results show that the most robust techniques, like conditional simulation, are required to avoid over-smoothed maps that do not reflect the actual variability of the parameters [13]. Unlike kriging that provides a single prediction for each parameter of interest, simulation yields as many case scenarios as desired, which are helpful to assess the uncertainty in the actual (unknown) parameter values at any specific location or jointly over several locations.

In comparison to the classical interpolation techniques, geostatistics considers the variability of the variable in several orientations (through the variogram computation) and can be applied to both anisotropic and isotropic case studies, unlike the classical approaches.

#### Acknowledgements

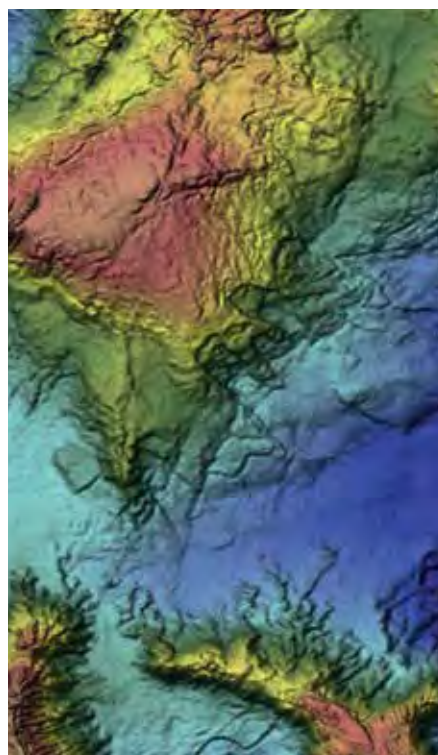
This work was fully financed by FEDER funds in the scope of the Next-sea project (NORTE-01-0145-FEDER-000032).

#### REFERENCES

- Bockelmann, F. D., Puls, W., Kleeberg, U., Muller, D., Emeis, K. C. (2018). Mapping mud content and median grain-size of North Sea sediments – A geostatistical approach. *Marine Geology*, vol. 397, pp. 60-71.
- Diesing, M., Green, S. L., Stephens, D. and Lark, R. M. (2014). Mapping sea bed sediments: Comparison of manual, geostatistical, object-based image analysis and machine learning approaches. *Continental Shelf Research*, vol. 84, pp. 107-119.
- Jerosch, K., Schluter, M. and Pesch, R. (2006). Spatial analysis of marine categorical information using indicator kriging applied to georeferenced video mosaics of the deep-sea Håkon Mosby Mud. *Ecological informatics*, vol. 1, pp. 391-406.
- Meiliand, E., Alfian, D. and Huhn, K. (2011). Sediment grain-size distribution analysis at the shallow sandy shelf of the North Sea using multivariate geostatistics. *Procedia Environmental Sciences*, vol. 7, pp. 317–322.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature based on sand–silt–clay ratios, *Journal of Sedimentary Research*, vol. 24, pp. 151–158.
- Verfaillie, E., Da Four, I., Van Meirvenne, M. and Van Lancker, V. (2009). Geostatistical modelling of sedimentological parameters using multi-scale terrain variables: application along the belgiana part of the north sea. *Journal of Geographical Information Science*, vol. 23(2), pp. 135-150.

# SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E GESTÃO DE DADOS DO AMBIENTE MARINHO

**5<sup>as</sup>** JORNADAS  
DE ENGENHARIA  
HIDROGRÁFICA





# Base de dados do oceano - caracterização oceanográfica da região do Atlântico Noroeste

M. Hipólito Limpinho (1), C. Lopes da Costa (2)

- (1) Escola Naval, Marinha, mariana.hipolito.limpinho@marinha.pt  
 (2) Escola Naval, Marinha e CINAV, carlos.lopes.costa@marinha.pt

**Resumo:** Aplicação informática elaborada em *software* MATLAB que lê dados climáticos da NOAA *World Ocean Database* (2013), de resoluções espaciais de 1° e ¼°, anual, sazonal e mensal, e seguidamente apresenta tabelas e gráficos possíveis de aplicar a qualquer área oceanográfica mundial, através do cálculo e representação de características físicas e químicas (temperatura conservativa, salinidade absoluta, densidade e velocidade do som) bem como das correntes geostróficas médias. Esta aplicação é demonstrada, através da caracterização oceanográfica da região do Atlântico Noroeste, envolvendo a circulação de grande escala, bem como das massas de água presentes e estudo de fenómenos identificados nesta área em particular.

**Palavras-chave:** Base de Dados, Atlântico Noroeste, Propriedades físicas da água do mar, Massas de água, Corrente do Golfo.

## 1. INTRODUÇÃO

As correntes oceânicas resultam do efeito do vento e das variações de densidade da água, juntamente com a rotação da Terra, com os acidentes geográficos e topográficos do fundo marinho. Perfazem uma circulação geral média de grande escala e de mesoescala, que transporta calor e massas de água. Por forma a poderem ser estudados os vários fenómenos característicos das grandes bacias oceânicas, foi desenvolvido um programa em *software* MATLAB, capaz de representar os dados da *World Ocean Database*, 2013, da NOAA (accedida de <http://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/woa13/woa13.pl?parameter=s>), em gráficos perceptíveis ao estudo de região escolhida. Neste trabalho analisamos os resultados desta ferramenta e caracterizamos o Atlântico Noroeste. Será realçada a Corrente quente do Golfo (CG), a Corrente fria do Labrador (CL) e a Corrente do Atlântico Norte (CAN). Verificam-se nesta região estruturas de mesoescala, tais como vórtices, *eddies*, meandros e jatos, que, no entanto, não são visíveis nesta base de dados uma vez que se trata de uma climatologia construída a partir de séries observadas entre 1955 a 2012, disponíveis em 102 níveis de imersão, nas resoluções de 1° ou de ¼°.

## 2. CARATERIZAÇÃO DO ATLÂNTICO NOROESTE

A área de estudo é visível no mapa geográfico (ver Figura 1), compreendida entre 28°30'N a 50°30'N e 075°30'W a 035°30'W.

A margem continental da Costa Leste da América do Norte é classificada de passiva (afastada de fronteiras de placas tectónicas), caracterizada por uma plataforma continental pouco profunda e extensa,

visível na Fig. 1. A região costeira recebe as águas de inúmeros rios que aqui desaguam, salientando-se as bacias hidrográficas do Rio São Lourenço e as das baías de Delaware e de Chesapeake.

A CG, intensa e profunda, inicia-se entre o estreito da Florida e as ilhas Baamas, encostando-se à linha de costa, sobre a plataforma continental, seguindo ao longo do talude continental, percorrendo-o mais ou menos em paralelo. Quando atinge o Cape Hatteras, na Carolina do Norte, inicia a sua divergência ou afastamento para leste, entrando sobre a planície abissal, deixando de seguir a sua rota tão junto ao talude continental.

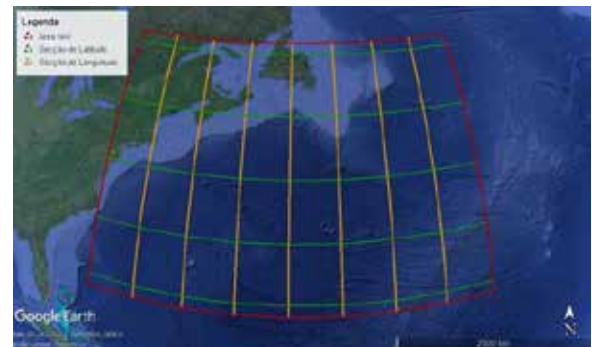


Fig. 1. Representação gráfica da área de estudo por divisões em cinco secções de latitudes 29°30'N, 34°30'N, 39°30'N, 44°30'N, 49°30'N, e em oito secções de longitudes 070°30'W, 065°30'W, 060°30'W, 055°30'W, 050°30'W, 045°30'W e 040°30'W. Retirado do Google Earth Pro.

Devido à convergência de correntes induzidas pela circulação e vento regional ocorrem movimentos descendentes (*downwelling*) na base da camada de Ekman. Às divergências horizontais associam-se movimentos ascendentes (*upwelling*). Na área delimitada distingue-se a convergência subtropical (de 30°N a 40°N na transição dos alísios de leste

para os ventos de oeste) e convergência subártica (dos 50°N aos 55°N) no extremo norte. Na divergência subpolar ártica (em cerca de 60°N) verifica-se ascensão de águas de subsuperfície, em conformidade com a bombagem de Ekman, o que contribui para a redução da espessura da termoclina permanente, caso esta ainda se revele. Na zona central e sul da área delimitada, na mencionada convergência subtropical norte, a água é acumulada e bombeada, da superfície para profundidade, contribuindo para o afundamento da termoclina permanente, até cerca de 1.100-1.200 m.

### 2.1. Massas de água

As águas centrais ocidentais estão associadas aos principais giros subtropicais delimitados pelas águas superficiais polares onde as águas pouco salinas, provenientes da precipitação, escoamento e fusão do gelo, contribuem para formar as águas frias e pouco salinas que posteriormente se afundam para formar águas intermédias (Emery e Meincke, 1986, p. 388).

Há duas classificações para as águas costeiras presentes na área delimitada. Uma é a *shelf water* (água de plataforma) situada sobre a plataforma continental, pouco salina devido à influência das descargas fluviais das bacias hidrográficas da América do Norte, regiões de elevada precipitação e de degelos. A segunda é a *slope water* que é a água do mar proveniente da CL posicionada ao largo da *shelf water*, entre esta a CG, sobreposta ao talude continental, também misturada com água da *shelf water*.

No oceano inferior ou abaixo da termoclina permanente, os movimentos das massas de água (intermédias, profundas e de fundo) são geostróficos (sem atrito) e devidos a gradientes de densidades e de pressões, em equilíbrio com a força de Coriolis.

### 2.2. Correntes da área

Do giro subtropical fazem parte as correntes Equatorial Norte (CEN), a das Antilhas, a das Caraíbas, a da Florida, a CG, a CAN e a das Canárias. Do giro subpolar fazem parte a CAN (comum ao giro subtropical), a da Noruega, a do Leste da Gronelândia, a do Oeste da Gronelândia e a CL. A CEN, propulsionada pelos ventos alísios de nordeste (corrente transversal entre as duas margens da bacia oceânica), flui de leste para oeste, alimentando a Corrente das Caraíbas e das Antilhas, a fluir para noroeste ou interior do Golfo do México. De seguida a Corrente da Florida que sai do Golfo do México, pelas Florida Keys, para norte, é continuada pela CG para norte-nordeste. Esta pode atingir velocidades de 4 nós. Na longitude da Terra Nova a CG dá origem à CAN para nordeste. Divide-se e contribui para as circulações subpolares dos mares da Noruega, da Gronelândia e do Ártico, bem como um ramo na origem da Corrente dos Açores (CA). Detalhes podem ser encontrados em Pickard e Emery, 1990, pp. 144-145. Muitas vezes os

meandros da corrente fecham-se em vórtices (*eddies*) isolados que continuam em rotação. No lado quente da corrente, os *eddies* têm núcleos frios, enquanto no lado frio têm núcleos quentes. Estes *eddies* podem persistir meses a anos e continuar a migrar no escoamento onde estão embebidos.

Na parte noroeste da área em estudo existe também a CL, a fluir para sul, entre a CG e a Costa Leste da América do Norte. A CL, tem um transporte de 3,4 a 4,5 Sv, flui a sudeste das costas leste do Labrador e Terra Nova, transportando água fria que cobre os Grand Banks da Terra Nova. A parte leste da CL é aumentada pela água menos fria da Corrente de Irminger. A sul da Terra Nova e dos Grand Banks, a CL encontra-se com a CG, sendo que, a nordeste dos Grand Banks, aquelas são continuadas pela CAN (UKHO, NP50, 2011, p. 19).

## 3. METODOLOGIA - PROGRAMA MATLAB

A ferramenta desenvolvida em *software* MATLAB permite efetuar a leitura de dados climáticos da NOAA *World Ocean Database* (2013) (temperatura *in situ* e salinidade prática) e, recorrendo às funções da *GSW Oceanographic Toolbox of International Thermodynamic Equation of Seawater 2010* (TEOS 2010), para o cálculo da densidade, velocidade do som e geostrofia, para gráficos e tabelas com estatísticas da temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som. É utilizada uma janela de interface gráfica que possibilita ao utilizador a escolha de áreas pré-definidas no programa ou de uma área inserida por ele (com colocação de duas latitudes e duas longitudes de delimitação da área), a época (anual, sazonal ou mensal), resolução espacial (1° ou ¼°), a imersão (gráficos horizontais da área), a latitude fixa (representação das propriedades na secção vertical de latitude), a longitude fixa (representação das propriedades na secção vertical de longitude) e nível profundo assumido sem movimento (para o cálculo dos gráficos de componentes geostróficas). Por gestão de espaço não alongamos mais sobre a base de dados e *software*.

## 4. RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DA ÁREA

Todas as imagens seguintes têm uma resolução de 1°, por ser a que mais explicitamente permite analisar os gráficos, e são respeitantes a climatologias médias anuais (entre 1955 e 2012). Como se pode ver na Fig. 2 a), aos 0 m de imersão (na superfície) na proximidade da Terra Nova e da Nova Escócia (parte noroeste da área) verificam-se temperaturas mais frias. Pela orientação das isolinhas das temperaturas vê-se claramente a entrada da CG, por volta de 35°N, constatando-se menores gradientes a sul que a norte. À superfície (0 m) a água fria e pouco salina é consistente com a *shelf* e a *slope waters* e com a água proveniente da CL. A Figura 2 b) revela no lado costeiro da Terra Nova, devido à descarga dos rios, uma salinidade

menor, na metade norte da área, a norte dos 40°N, onde é evidente uma frente de salinidade nos 33 a 36 g/kg. Nos 30°N nota-se a transição de salinidade para 37 g/kg, revelando desta forma uma maior salinidade, localizada a sul da área. Próximo da superfície nota-se que as maiores temperaturas correspondem maiores salinidades. Na Figura 2 c) observam-se que as densidades na superfície variam relativamente pouco e são visíveis as isopícnicas de 1.025 e 1.026 kg/m<sup>3</sup>. Como a velocidade do som é dependente da temperatura e da salinidade, para além da pressão, será de esperar velocidade do som um pouco menor no lado norte, como se verifica na Figura 2 d). São identificados apreciáveis gradientes horizontais da velocidade do som.

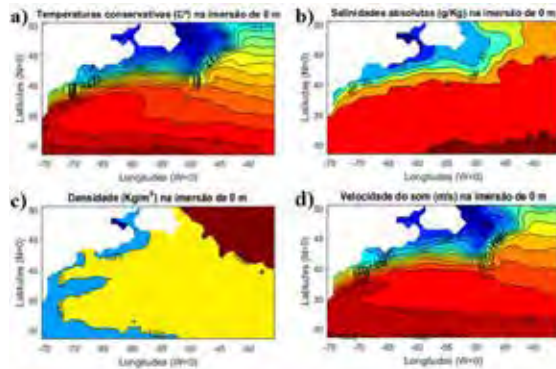


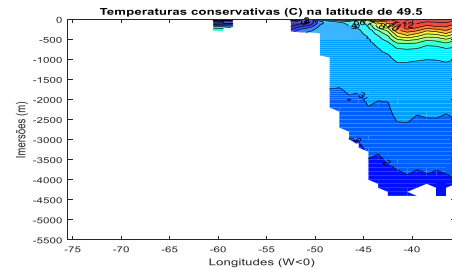
Fig. 2. Resultados gráficos produzidos pelo programa elaborado. Gráficos de temperatura conservativa (entalpia potencial dividida pelo calor específico da água do mar na superfície) (a), salinidade absoluta (b), densidade (c) e velocidade do som (d) do Atlântico Noroeste à superfície (na imersão 0 m). Valores médios anuais, na resolução de 1°.

Através da Fig. 3, correspondente à secção vertical de 49,5°N, nota-se a água fria da CL, no lado costeiro ou junto ao talude continental (cerca de 050°W), assim como a menor salinidade, em contraste com a parte a leste mais salina e de maior temperatura da CAN. Também em coerência com a distribuição das temperaturas e das salinidades, a velocidade do som apresenta valores maiores associados à CAN, da superfície até cerca de 1.000 m e valores menores correspondentes à água da CL, conforme Fig. 3 a), b) e c).

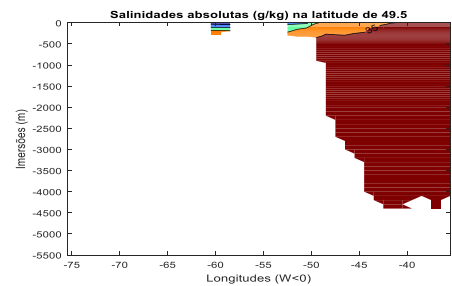
Na Fig. 4 a), b) e c), no mapa da área delimitada, a corrente geostrofica à superfície, referida a 1000 dbar, nas componentes N/S e E/W e na forma vetorial, é impossível de identificar, perante a mancha branca associada a terra. Na componente N/S, na Fig. 4 a), não é visível um padrão consistente de continuidade da CG. No entanto, na Fig. 4 b), componente E/W do gráfico, vê-se corrente apreciável com continuidade de oeste para leste, entre as latitudes 34°N e 42°N, com valores positivos (para leste), consistentes com a CG a ir divergir para o largo (para leste). Apresenta valores positivos na latitude 36°N a 40°N e de 073°W até 050°W, o que corresponde à existência de uma componente predominante e positiva (para leste). É também visível, no canto inferior direito, valores

positivos de 0,05 m/s, os quais podem ser associados à CA.

a)



b)



c)

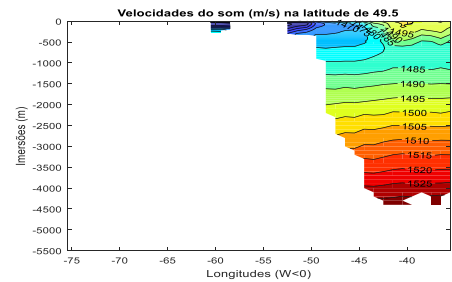


Fig. 3. Resultados gráficos produzidos pelo programa elaborado. Gráficos de temperatura conservativa (a), salinidade absoluta (b) e velocidade do som (c) na secção vertical de latitude fixa de 49,5°N. Valores médios anuais, na resolução de 1°.

Os vetores da corrente (Fig. 4 c)) são consistentes com a intensificação ocidental (CG ao longo da margem continental) e consistente na variação de imersão até 800 m (aqui não mostrado). A maior intensidade de corrente encontra-se nos 500 m superiores, no entanto, o gráfico da forma vetorial aos 900 m ainda tem algum registo residual desta corrente (também aqui não mostrado).

Na secção vertical de longitude 070,5°W, representada pela Fig. 5 a), é visível, perto da latitude 37°N, um núcleo forte da componente E/W da CG, a fluir para leste, tão profunda quanto os 800 metros. É suposto, nas secções mais a leste, afastar da costa, a largura da CG aumentar progressivamente até atingir o seu máximo de extensão. Revela-se até 800 metros, na imersão vertical, com mais de 0,05 m/s. A parte azul escura (entre 30°N e 33°N) revela uma corrente contrária (de leste para oeste) à CG.

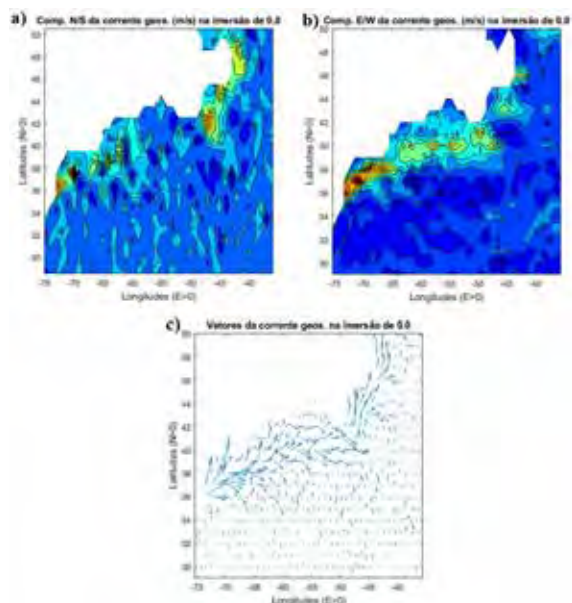


Fig. 4. Resultados gráficos produzidos pelo programa elaborado. Gráficos da corrente geostrofica na componente N/S (a), componente E/W (b) e forma vetorial das correntes (c) do Atlântico Noroeste à superfície (na imersão de 0 m). Valores médios anuais, na resolução de 1°.

Através da Figura 5 b) é visível o núcleo da CG com o seu centro nos 39°N, com largura na superfície (jato principal) de cerca de 360 km. É ainda aparente uma espécie de contracorrente (secundária) ao lado, em 36° a 37°N, mais estreita, com cerca de 90 km. Na sucessão da Figura 5 a), b) e c), é visível que as secções para leste, vão demonstrando que o centro do núcleo da CG tende a dirigir-se de 37°N para 41°N, isto é, a posicionar-se cada vez mais para norte à medida que esta flui para leste.

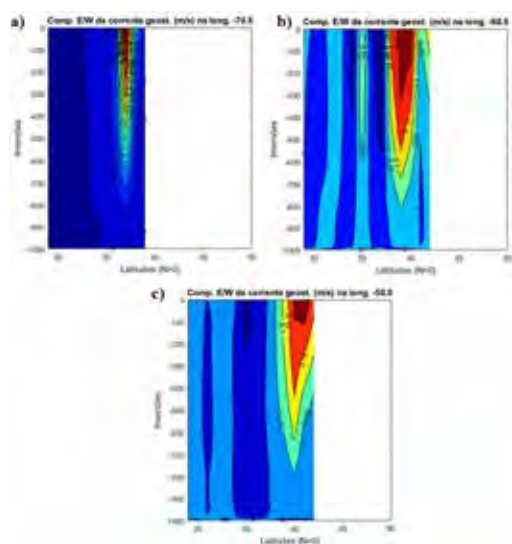


Fig. 5. Resultados gráficos produzidos pelo programa elaborado. Gráficos da componente E/W da geostrofia vertical de longitudes: a) 070,5°W; b) 060,5°W e c) 050,5°W. Valores médios anuais, na resolução de 1°.

Na secção vertical de longitude 050,5°W, na Figura 5 c), a 41,5°N, a corrente aproxima-se do talude continental (na ponta sudeste do Grand Bank) bastante nítida pelo contorno de 0,05 m/s, com o

núcleo mais superficial a ultrapassar os 0,2 m/s, com 800 m de imersão. O Grand Bank acaba por constringer a corrente (efeito de parede), que fica com cerca de 430 km de largura superficial. A sul da CG nota-se uma contracorrente com valores que pontualmente chegam a exceder os 0,05 m/s.

## 5. CONCLUSÃO

A ferramenta desenvolvida permite avaliar, de modo consistente e sistemático, em gráficos de secções horizontais e verticais, as estruturas de temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som, bem como as estatísticas associadas (não apresentadas neste artigo). Permite ainda visualizar perfis verticais destas mesmas propriedades por posições geográficas (intersecção das secções horizontais e verticais), não analisadas neste artigo. A ferramenta resolve ainda gráficos de secções horizontais e verticais da corrente geostrofica média (por cada imersão seleccionada).

Conseguiu-se notar a posição média das frentes térmicas e salinas presentes, em particular das diretamente associadas à Corrente do Golfo. A representação gráfica permitiu a correta identificação das estruturas presentes no Atlântico Noroeste, e prova que esta aplicação informática pode ser utilizada para qualquer área de interesse do oceano.

## Agradecimentos

Agradece-se à Escola Naval pela formação e oportunidades de investigação.

## REFERÊNCIAS

- EMERY, W. J., MEINCKE, J. (1986), "Global water masses: summary and review, "Water masses Global distribution Temperature Salinity", *Oceanologia Acta* 1986 – vol 9 - N°4, pp. 383 a pp. 391, <http://archimer.ifremer.fr/doc/00110/22090/19731.pdf>, acedido em 14 de dezembro de 2017.
- INTERGOVERNAMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (2010), *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: calculation and use of thermodynamic properties*, Manual and Guides 56, descarregado a partir de [www.TEOS-2010.org](http://www.TEOS-2010.org) em fevereiro de 2017.
- PICKARD, George L., EMERY William J. (1990), "Descriptive Physical Oceanography, An Introduction", 5 ed., Edited by Elsevier, Pergamon Press, Oxford Amsterdam Boston London New York Paris San Diego San Francisco Singapore Sydney Tokyo 1982.
- UKHO (2011), "Newfoundland and Labrador", Admiralty Sailing Directions, NP50, 13 ed., 2011, UKHO, pp.1 a 56.

# ODYSSEA - Operating a network of integrated observatory systems in the Mediterranean Sea

C. Figueiredo (1), I. Pedro (1), A. Silva (2), P. Galvão (2), J. Rodrigues (2) and P. Leitão (2)

(1) Edisoft, Sa. Rua Calvet Magalhães, 245, 2770-153 Paço de Arcos; carlos.figueiredo@edisoft.pt

(2) HIDROMOD, Lda. R. Rui Teles Palhinha, 4, 1º, 2740-278 Porto Salvo.

**Abstract:** This paper presents an overview of the H2020 ODYSSEA project with special emphasis on data management related issues. The goal of ODYSSEA is to set up an interoperable and cost-effective platform integrating data from observation and forecasting systems across the Mediterranean basin, building on key initiatives such as Copernicus, GEOSS, GOOS, EMODNet, ESFRI, Lifewatch, Med-OBIS and others.

A particular capacity of the first release (summer 2018) described in the paper is the integration, fusion, standardization, transformation and dissemination as OGC standard services of different data sets from different providers, locally acquired in-situ data and results from local high resolution models.

Applying advanced algorithms to homogenize and fuse large quantities of data, the platform will provide derived data services on-demand through a single public portal to a wide range of end-user groups and stakeholders.

**Key words:** interoperability, data fusion, OGC standard services, SOS, WMS, WFS, WCS, CSW

## 1 INTRODUCTION

ODYSSEA is a H2020 project that aims to develop, operate and demonstrate an interoperable and cost-effective platform that fully integrates networks of observing and forecasting systems across the Mediterranean basin, addressing both the open sea and the coastal zone.

The platform is prepared to deliver a wide range of services focused on the needs of users involved in coastal management such as navigation safety, port operations, water pollution prevention and response, eutrophication risk management, search and rescue missions, etc. allowing to exploit the added value of integrated Earth Observation (EO) technologies (satellite, airborne and ground based), Copernicus Marine Service and ICT to deliver customized and ready to use information. These services will provide an easy way to get in-situ data, local high-resolution forecasts and products and services (e.g. meteo-oceanographic conditions at specific locations, identification of optimum or critical working windows, support to sea pollution response actions, etc.) to a broad range of different users.

In the following sections, we present an overview of the procedures that are being adopted concerning the following key data issues: data integration, data fusion and data standardization and dissemination.

## 2 DATA MANAGEMENT

Taking in consideration that the platform will gather a large diversity of data sets, the issues of data management and data quality control assume a

central concern. One goal is to ensure that data from different and diverse providers are readily accessible and useable by a wider community. In order to achieve this, the strategy is to move towards an integrated data system within ODYSSEA that harmonizes work flows, data processing and distribution across different systems.

The value of standards is clearly demonstrable. In oceanography there have been many discussions on processing data and information. Many useful ideas have been developed and put into practice, but there have been few successful attempts to develop and implement international standards in managing data.

### 2.1 The European context

Several initiatives exist in Europe for ocean data management, which are now coordinated under the umbrella of EuroGOOS. EuroGOOS is the network committed to develop and enhance the operational oceanography capacity of Europe as contribution to the intergovernmental Global Ocean Observing System (GOOS). The scope of EuroGOOS is wide and its needs are partially addressed by on-going developments in the scope of Copernicus, SeaDataNet and other EU initiatives.

Therefore, in order to improve quantity, quality and accessibility of marine information, to support decision making and to open up new economic opportunities in the marine and maritime sectors of Europe for the benefit of European citizens and the global community, it was agreed at the annual EuroGOOS meeting in 2010 that it is essential to meet the following needs (AtlantOS, 2016):



- ✓ Provision of easy access to data through standard generic tools; where “easy” not only means the direct use of data without concerns on data quality and processing but also that adequate metadata are available to describe how the data were processed by the data provider.
- ✓ To combine in situ-observation data with other information (e.g., satellite images or model outputs) to derive new products, build new services or enable better-informed decision-making.

These recommendations aim to reduce the duplication of efforts among agencies, to improve quality and reduce costs related to geospatial information, thus increasing data availability and making oceanographic data more accessible to the public, whilst fostering partnerships among stakeholders in the domain.

Along the last years, marine data integration initiatives such as the Copernicus in-situ data thematic centre (for access to near real-time data acquired by continuous, automatic and permanent observation networks), SeaDataNet (for quality controlled, long-term time series acquired by all ocean observation initiatives, missions, or experiments), EMODnet and several others have been making efforts to implement some relevant standards expected to facilitate the discovery and sharing of data among different users. These initiatives support both data providers, willing to share their observation data, and users, requesting access to oceanographic data (historic, real-time and forecasts).

ODYSSEA will follow similar guidelines, learning from these experiences and make improvements where they are required.

## 2.2 Data format and standards

Delivery of data to users requires common data transport formats which interact with other standards (vocabularies, data quality control). In practice, two major data types will be addressed: gridded data and in situ data. These data types are implemented in datasets from CMEMS (dynamic gridded data), EMODNet (static gridded data) and SeaDataNet (in situ data).

### 2.2.1 In situ data

In situ data include data from point time series, profiles, time series vertical profiles and trajectory profiles. For these, SeaDataNet procedures will deliver the main guidelines and NetCDF-CF will be the standard format to be adopted (SeaDataNet extension of the Climate and Forecast, 2018). Moreover, ODYSSEA will go one step further and use harmonized NetCDF files to feed an OGC SOS v2 service supported by the 52°North software package in order to provide an interface to the users,

via the Portal GUI. Additional interfaces with time series data will be implemented later by considering the usage of the OGC WFS protocol (GeoServer mapping engine) and download of NetCDF-CF files via FTP and HTTP protocols.

The 52° North SOS software implements the notion and concept of Observation which is based on the OGC/ISO Observation & Measurements model. We will briefly describe the most relevant terms used by the implementation of the 52° North software package. An observation is the act of observing a phenomenon, that we call observable property. In other words, it is a measurement of a parameter's value, in case the latter is numeric. Furthermore, we say that an observation is registered by a procedure (e.g. tidal gauge) at a given location, whose term is feature of interest, and at a given time, called phenomenon time. Finally, the SOS allows for observations to be grouped in offerings, according to a certain criteria that the user may define. All these terms can be linked through a time series, uniquely characterized by the combination of procedure, offering, observable property and feature of interest, and that consists of a set of observations. The schema in Fig. 1 summarizes and relates these concepts using database tables from the SOS containing only the most important columns (52°North Sensor Observation Service 4.x Database model).

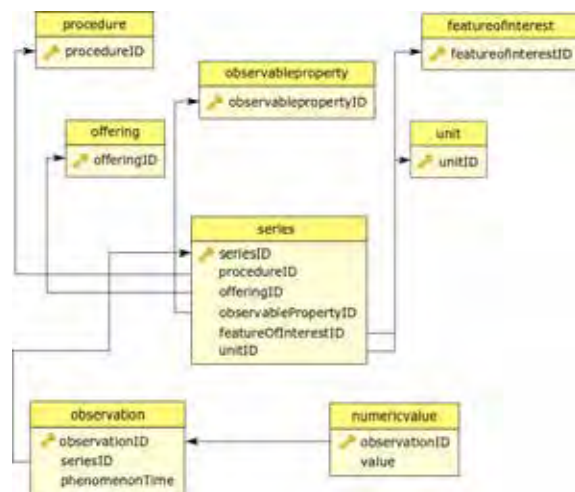


Fig. 1. Simplified SOS Database model.

In summary, we have a harmonized format in which all data is stored, and an interoperable interface for data publication and consulting. Therefore, we must define a mapping between the former and latter components, in order to guarantee the data flow from the data producer to the data consumer.

The SeaDataNet extension of the NetCDF CF convention consists of a set of:

- ✓ dimensions: INSTANCE, corresponding to the number of datasets, and MAXT, in the case of time series, which is the total number of time steps;

- ✓ variables, which may be coordinate (contain the spatial-temporal information), geophysical (measured parameters) or ancillary (as support), where each variable is characterized by a set of attributes (e.g. units);
- ✓ global attributes, concerning the entire file.

In the harmonized NetCDF file, there is a global attribute that points to the dataset metadata, in SensorML format, from which we can extract the procedure information to be inserted in the SOS, through the *InsertSensor* operation. For now, we will simply identify the data offering with the procedure, but one can organize the data as desired. The spatial coordinate variables, usually latitude, longitude and depth are mapped to the feature of interest, whereas each geophysical variable corresponds to an observable property and contains the corresponding unit. These five components constitute a series whose template can be inserted in the SOS using the *InsertResultTemplate* operation. Finally, multiple observations can be inserted “in batch” using the *InsertResult* operation, where the phenomenon time and (numeric) value of each observation correspond to the respective values of the temporal coordinate and geophysical variables.

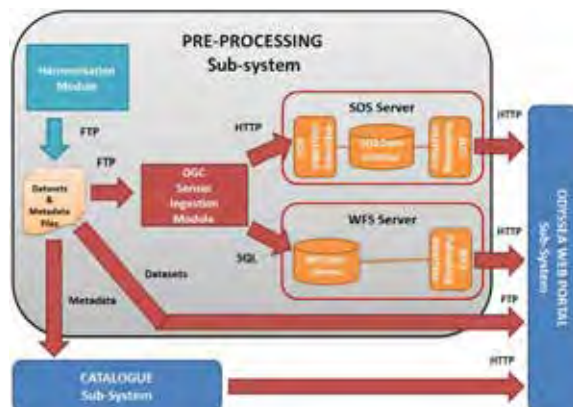


Fig. 2. Pre-processing sub-system.

The workflow is split into 4 phases. In Phase I, all in situ data are ingested by the harmonization module, which standardizes all incoming data. For Phase II, the user data provider is liable to contribute with descriptive information about the measurements, equipment used, sensor information and contacts. All this information is used to harmonize the data following Open Geospatial Consortium (OGC) directives for services and metadata.

In Phase III, the system performs three steps: the metadata produced by the data provider, following the European INSPIRE Directive, is published in the ODYSSEA catalogue. The processes executed in this phase create a link between the metadata and the data to be ingested; it also produces and publishes the data in Sensor Model Language (SensorML) and creates the SeaDataNet NetCDF (CF) using the NEMO Software. These files are ingested by an

OGC module that reads the data and adds it to the SOS and WFS services in Phase IV.

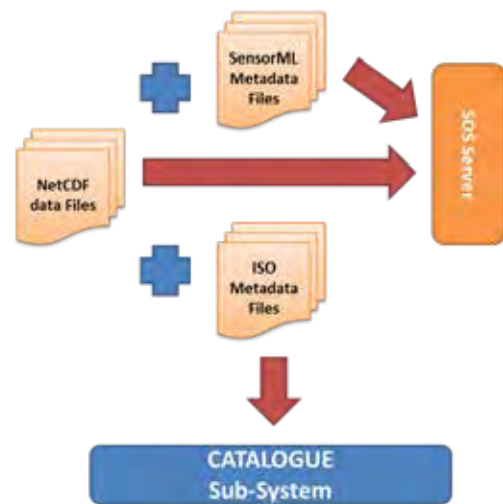


Fig. 3. SOS and WFS Database.

### 2.2.2 Static gridded data

ODYSSEA is adopting the recently proposed SeaDataNet standards for marine chemistry (to support the EMODNet Chemistry pilot), bathymetry (to support the EMODNet Hydrography and Seabed Mapping pilots), geology and geophysics (to support the Geo-Seas project and the EMODNet Geology pilot) as well as marine biology.

### 2.2.3 Dynamic gridded data

For dynamic gridded data, the CMEMS standards will be followed. The files will be available in NetCDF CF format using the coordinated system WGS 84 (EPSG:4326). Access to the data is done via Motu, a robust web server which fills the gap between heterogeneous data providers and end users. Motu handles, extracts and transforms huge volumes of oceanographic data without performance degradation, and offers a web service interface which implements the OGC WCS standard.

### 2.3 Metadata, vocabulary and catalogues

The issue of metadata, vocabulary and catalogues is of primary importance for interoperability and easy discovery of data.

All files will conform to metadata conventions (<http://cf-pcmdi.llnl.gov/>) designed to promote the processing and sharing of files, and will make use of the NetCDF CF API. These conventions define the metadata that describes the data with respect to each variable as well as the spatial and temporal properties of the data. This enables users from different oceanographic sub-domains to assess data comparability and facilitates the building of powerful applications with extraction, re-gridding, and display capabilities.

All data sets available on the ODYSSEA Platform have associated metadata supporting interoperability in accordance with the European INSPIRE Directive. In addition to this, for in situ data, SensorML is applied as an identification card of the sensor used in the observation.

One important prerequisite for consistency and interoperability is the use of a common vocabulary in all meta-databases and data formats. ODYSSEA follows the NERC Vocabulary Server (NVS2.0) hosted and managed by the British Oceanographic Data Centre (BODC).

The metadata information describing ODYSSEA services and products will be maintained in the catalogue application GeoNetwork, allowing the users (via GUI) and other systems (via OGC CSW Protocol) to search resources using temporal and spatial queries. GeoNetwork also provides the means to execute automated harvesting requests to other catalogues systems collecting relevant metadata records for ODYSSEA.

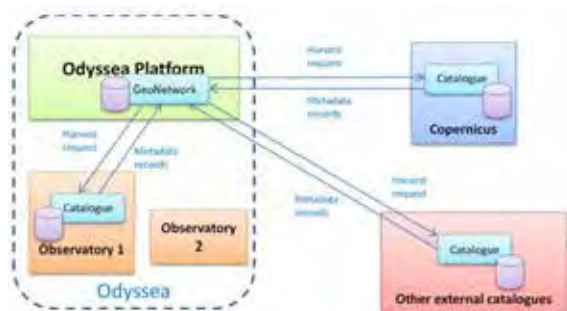


Fig. 4. ODYSSEA Catalogue.

#### 2.4 Data integration and fusion

Data integration and fusion are focused on improving the quality and robustness of the atmospheric boundary conditions of catchments/sewer (e.g., precipitation and evapotranspiration fields), hydrodynamic (momentum and heat fluxes) and wave (momentum fluxes) forecast models. As a standard procedure, high resolution local/regional prognostic models (e.g. WRF) will be downscaling forecasts produced by large scale solutions (e.g. ECWMF, NOAA GFS).

Additionally, the time series forecast service will provide some parameters (e.g. significant wave height, wind speed, air temperature) and put together forecasting solutions, allowing by this way to present graphically the uncertainty associated with the forecast models.

#### 2.5 Data quality control

The data quality control has two sub-components: one focusing on the quality of observed in-situ data (e.g. tidal gauges, wave buoys, weather stations, etc.) and another in the modelled forecasts. In the first case, when uploading the data, the user will

choose the validation performed before submission of the data. According to SeaDataNet criteria, each time observation must be classified from 0-9, corresponding to no quality control, good value, probably good value, probably bad value, bad value, changed value, value below detection, value in excess, interpolated value and missing value, respectively.

In the second component, model gridded data will be automatically compared with observations (e.g., buoys and CMEMS grid observation products) and the statistical analysis will be made available on a daily basis to the end users.

#### Acknowledgements

The ODYSSEA project is receiving funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N. 727277.

#### REFERENCES

- AtlantOS (2016). Data Management Handbook.
- Geoserver mapping engine, <http://geoserver.org/>.
- GeoNetwork, <https://geonetwork-opensource.org/>.
- SeaDataNet (2010), Data Quality Control Procedures.
- SeaDataNet (2017). Data File Formats: ODV, Medatlas, netCDF. Deliverable D8.5.
- SeaDataNet (2018). SeaDataNet data file formats: Data Transport Formats manual.
- 52°North SOS project, <https://52north.org/software/software-projects/sos/>.
- 52°North Sensor Observation Service 4.x Database model, <https://wiki.52north.org/SensorWeb/SensorObservationServiceDatabaseModel>.
- 52° North SOS 4.x Documentation, <https://wiki.52north.org/SensorWeb/SensorObservationServiceIVDocumentation>.

# O Compromisso Inspire - Contribuição da Oceanografia no Hidrográfico

S. Almeida (1), S. Godinho (1) e A. S. Martinho (1)

(1) Instituto Hidrográfico. sara.almeida@hidrografico.pt

**Resumo:** A Diretiva INSPIRE, que estabelece a Infraestrutura de Informação Geográfica da Comunidade Europeia, foi transposta para a legislação portuguesa em 2009, tendo sofrido a última alteração em 2017. O Instituto Hidrográfico (IH), enquanto Instituição da Administração Direta do Estado, tem obrigação de disponibilizar a informação relativa aos conjuntos e serviços de dados geoespaciais que produz. Da publicação da Lei Orgânica do IH em 2015, decorre a responsabilidade nacional nas áreas de marés, agitação marítima, correntes e de outros parâmetros relevantes para o estudo do oceano, através da operação de redes de monitorização do meio marinho.

Desta forma, o IH tem a possibilidade de partilhar informação técnico-científica, junto com outras instituições, numa infraestrutura comum, possibilitando aos cidadãos europeus, a pesquisa, visualização e o acesso a informação geoespacial proveniente de diversas entidades.

Neste artigo será apresentado o trabalho já desenvolvido, na área da Oceanografia, com vista ao cumprimento desta conjugação de obrigações.

**Palavras-chave:** INSPIRE, INSPIRECORE, oceanografia, agitação marítima

## 1. INTRODUÇÃO

“A Comissão Europeia, via *DG Environment* e *Eurostat*, com o apoio do *Institute for Environment and Sustainability* do *Joint Research Center* e da Agência Europeia do Ambiente, lançou em 2001, a iniciativa INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe), para a promoção da disponibilização de informação de natureza espacial...”

Depois de algum caminho percorrido, a Diretiva INSPIRE foi publicada pelo Parlamento Europeu em 2007 e transposta para a Lei Portuguesa através do Decreto-Lei nº 180/2009, de 7 de agosto. Esta legislação estabelece a criação de uma Infraestrutura Europeia de Informação Geográfica, “que permite a disponibilização junto dos utilizadores, de serviços integrados de informação de natureza espacial baseados na existência de uma rede distribuída de bases de dados, ligadas com base em normas e protocolos comuns...” e apresenta as definições de conjuntos de dados geográficos (CGD), metadados, interoperabilidade, geoportais...

Em Portugal, foi criado o SNIG – Sistema Nacional de Informação Geográfica, presidido atualmente pela Direção Geral do Território (DGT) (Decreto-Lei nº84/2015).

Para cumprimento da Diretiva INSPIRE, foram identificados no total 34 temas, que foram distribuídos por três anexos. Os temas relacionados com a Oceanografia do IH, figuram no Anexo III e são os seguintes:

- Instalações de monitorização e do ambiente – “Localização e funcionamento de instalações de monitorização do ambiente incluem a observação e

medição de emissões, do estado das diferentes componentes ambientais e de outros parâmetros dos ecossistemas, ... pelas autoridades públicas” tema 7; - Características oceanográficas – “Condições físicas dos oceanos (correntes, salinidade, altura das ondas, etc.)” tema 15.

É sobre estes temas, 7 e 15, que versa este artigo.

## 2. CONTRIBUIÇÃO DA OCEANOGRAFIA

Da Lei Orgânica do IH decorre “responsabilidade nacional na área de marés, agitação marítima, correntes,... através da operação de redes de monitorização do meio marinho”.

O cumprimento da Diretiva INSPIRE na Oceanografia do Hidrográfico e a definição dos CDG considerados prioritários, não podia deixar de refletir aquela responsabilidade, sendo assinaladas três redes de monitorização: a maregráfica, a de boias e a de radares costeiros.



Fig.1. Portal do SNIG.

Para catalogar os CDG e garantir a interoperabilidade entre as infraestruturas identificadas, houve que garantir uma certa

uniformidade, quer nas ferramentas a usar para geração das fichas de metadados, quer no vocabulário a empregar.

A DGT, no portal do SNIG e no separador “Edição e Publicação de Metadados” apresenta os editores recomendados para produção dos mesmos e, refere outra documentação com informação esclarecedora sobre a temática.

Na Oceanografia (IH) foram produzidas as fichas de metadados utilizando o editor SNIMAR, em consonância com os padrões estabelecidos. Identificados os recursos disponíveis expõem-se, para cada um, as referências temporais, extensão geográfica e no caso das redes nacionais, sempre que aplicável, também foram atribuídos créditos às organizações que contribuíram para a produção do recurso. Na figura 1, apresenta-se um extrato do catálogo de pesquisa, com as redes IH, relativas ao tema “Instalações de monitorização e do ambiente”. Para o tema “Características Oceanográficas”, foram igualmente escolhidos três itens: dois associados a resultados de modelação, um referente a agitação marítima e outro, relativo a correntes superficiais. Um último recurso, resultará da análise mensal dos parâmetros de agitação marítima. No entanto, o IH poderá figurar noutros itens como produtor, na medida em que foi executante de levantamentos solicitados por outras entidades.

No catálogo de metadados do Hidrográfico (figura 2), utilizando como filtro a palavra – oceanografia, todos os itens enunciados anteriormente, são mencionados.



Fig.2. Geoportal do IH.

Quanto às palavras-chave consideradas relevantes para o cumprimento da Diretiva, INSPIRECORE, foi um termo de recomendação obrigatória. Em complemento, de um conjunto de vocábulos acessíveis nos editores, foram selecionados outros termos, como disciplina, plataforma, instrumento/sensor ou parâmetros.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO

A apresentação da Diretiva INSPIRE e a colocação em prática das várias metas foi calendarizada e, no que concerne aos temas do ANEXO III, a interoperabilidade dos dados e serviços tem de estar concluída até ao final de 2020.

Como suporte à operacionalização do SNIG, será constituída uma rede de serviços associada aos metadados já criados. A exemplo da implementação de um serviço de pesquisa e visualização, na figura 3, apresenta-se um protótipo do que poderá ser adotado para o caso das boias.

Para completar esta tarefa, foi necessário implementar algumas modificações no modelo das bases de dados de suporte a esta tipologia de recurso.

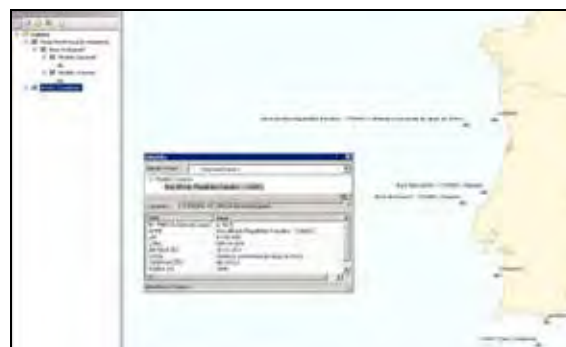


Fig.3. Serviço associado à rede de boias.

### 4. TRABALHO FUTURO

Perante a calendarização estipulada na Diretiva, terá de aplicar-se a metodologia de harmonização das bases de dados face às especificações técnicas promulgadas e implementar os serviços de rede para cada um dos temas considerados.

Nesse sentido, iremos trabalhar para programar as tarefas a realizar de forma sequencial no intuito de cumprir a Diretiva INSPIRE.

### REFERÊNCIAS

Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) [Em linha]. Disponível em: <http://snig.dgterritorio.pt/portal/> [Consult. 2018-02-17].

Infrastructure for spatial information in Europe (INSPIRE) [Em linha]. Disponível em: <https://inspire.ec.europa.eu/> [Consult. 2018-05-11].

Geoportal do IH [Em linha]. Disponível em: <http://gis.hidrografico.pt/geoportal/catalog/main/home.page> [Consult. 2018-05-12].

Diretiva 2007/2/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 14 de março de 2007.

Decreto-Lei n.º 180/2009, de 7 de agosto.

Decreto-Lei n.º 84/2015, de 21 de maio.

Decreto-Lei n.º 230/2015, de 12 de outubro.

Decreto-Lei n.º 29/2017, de 16 de março.

# Compilação de dados geológicos da plataforma continental portuguesa

C. I. Luz (1), A. Saramago (1) e A. Rodrigues (1)

(1) Instituto Hidrográfico. cecilia.luz@hidrografico.pt.

**Resumo:** O Instituto Hidrográfico (IH) é detentor de um acervo histórico geológico/sedimentológico de grande valor para a comunidade científica. Em 2004, foi adquirido pelo IH um sistema de gestão laboratorial, que através de programação específica, permite acesso a uma base de dados e o armazenamento dos resultados das análises efetuadas às amostras de sedimentos. Desde 2009 que este sistema está em uso no Laboratório de Sedimentologia e centraliza toda a atividade laboratorial. No entanto, dadas as funcionalidades do sistema foi possível desenvolver programação específica para a recuperação de informações anteriores a essa data, devidamente compiladas e validadas. A sua utilização tem-se verificado uma ferramenta válida e uma mais-valia na alimentação das Bases de Dados do IH, sendo utilizada, recorrentemente no âmbito de projetos e serviços sobre o ambiente marinho.

**Palavras-chave:** NAUTILUS, BD, dados históricos, programação, compilação.

## 1. INTRODUÇÃO

A 22 de setembro de 1960 é assinado pelo então Presidente da República Américo Thomaz e o Presidente do Conselho de Ministros António de Oliveira Salazar, o Decreto-Lei n. 43 177 que cria, integrado no Ministério da Marinha, o Instituto Hidrográfico (IH). A criação deste instituto adveio da necessidade de centralizar os serviços nacionais de hidrografia, oceanografia física e de navegação, que se encontravam então dispersos pelos Ministérios da Marinha e do Ultramar.

A ação do Instituto Hidrográfico abrangeria todo o território nacional, e as suas principais incumbências englobavam a realização de estudos e atividades nacionais relativas à hidrografia e oceanografia física e a assistência náutica às marinhas de guerra, mercante, de pesca e de recreio.

Conforme o artigo 9º, ao Serviço de Hidrografia competia, entre outras tarefas, a elaboração, atualização e correção de diversos tipos de cartas entre as quais as cartas litológicas. Esta tarefa estava interligada à compilação de elementos para a determinação da batimetria oceânica e geologia marinha, realizada pelo Serviço de Oceanografia Física (alínea d) do artigo 10º). O IH, com estas atribuições, sempre teve responsabilidades sobre o a natureza dos fundos marinhos, primando pela qualidade dos dados colhidos. Nesse sentido, ao longo dos tempos tem vindo a proceder ao apetrechamento e à melhoria contínua dos seus laboratórios, onde eram analisadas todas as amostras colhidas para o cumprimento da sua Missão, solidamente assente na realização inúmeras campanhas de cariz científico e técnico. Como exemplos de estudos em que a colheita e análise de amostras de sedimentos constituíram uma tarefa importante, são de destacar os seguintes:

- Campanhas oceanográficas ou geológicas integradas em projetos de investigação científica financiados por fundos nacionais ou europeus;
- Cartografia dos depósitos sedimentares da margem portuguesa (Programa SEPLAT, na plataforma continental, e Programa SEDMAR, nas margens insulares e continental);
- Determinação de manchas de empréstimo para alimentação artificial de praias;
- Determinação do grau de contaminação em projetos de dragagem;
- Caracterização sedimentológica e geotécnica de áreas onde se irão desenvolver projetos de aproveitamento de energias renováveis associadas ao mar (vento e ondas);
- Estudos de caracterização e monitorização ambiental em zonas costeiras para avaliação de impactes induzidos pela implantação de estruturas portuárias;
- Diversas campanhas para desenvolvimento de novas estratégias de observação dos fenómenos de dinâmica sedimentar.

Reconhecido internacionalmente como uma instituição de excelência que sempre contribuiu para o conhecimento do mar e o desenvolvimento da tecnologia na área das ciências do Mar, foram estas inúmeras campanhas que permitiram que atualmente o Instituto Hidrográfico seja detentor de um vasto arquivo de dados geológicos que importa manter atualizado e vivo.

Em face do enorme volume de amostras de sedimentos colhidas ao longo da sua história, e dos registos associadas a cada estação, cada análise realizada e cada arquivo físico, surgiu a necessidade

absoluta de reunir todas estas informações numa única base de dados.

Considerando ainda que, após a sua entrada em laboratório, e consoante o fim a que se destinava o estudo, eram aplicadas técnicas laboratoriais e analíticas que evoluíram ao longo dos tempos, tendo, inclusivamente, algumas deixado de ser praticadas atualmente. Não havendo automatização e utilização de meios informáticos no laboratório de sedimentologia, o registo analógico era o mais frequente, ficando arquivados em pastas e arquivos, identificados por projetos e pelos anos em que eram executados.

## 2. OBJETIVO

Com a evolução para o arquivamento digital dos dados numa Base de Dados (BD) *Oracle* do IH foi considerado que era uma mais-valia proceder-se à aquisição, em 2006, de um sistema que permitisse não só a gestão laboratorial de amostras como permitisse o armazenamento dos resultados obtidos. Assim, foi adquirido o *software* NAUTILUS para utilização inicial pelos laboratórios de química da Divisão de química e Poluição do Meio Marinho e que, em 2009, passou a ser igualmente utilizado pelo laboratório de sedimentologia da Divisão de Geologia Marinha. Com a implementação deste sistema de gestão de dados laboratoriais, considerou-se ser premente proceder-se à normalização do arquivamento dos dados analógicos, anteriores a essa data, passando-os para o formato digital e integrando-os com os dados mais recentes. Assim, estabelece-se como objetivo deste trabalho a descrição dos procedimentos adotados para a compilação, programação e desenvolvimento efetuado para acesso e introdução dos dados na BD *Oracle*, tendo em vista o armazenamento de dados, a sua salvaguarda e a sua reutilização no âmbito de projetos de I&D, quer sejam executados no IH, quer sejam da responsabilidade de outras instituições e utilizadores.

## 3. LABORATORY INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM - NAUTILUS

O *Laboratory Information Management System* (LIMS) *Nautilus* é um *software* da *Thermo Fisher Scientific* que permite a administração dos dados laboratoriais e a rastreabilidade das amostras seguindo rotinas laboratoriais e padrões de conformidade pré-estabelecidos. Atualmente, este *software* cumpre com as necessidades sentidas pelos vários setores do laboratório de sedimentologia da Divisão de Geologia Marinha uma vez que se trata de um sistema de gestão flexível e configurável e que satisfaz as exigências aplicáveis a dados dinâmicos. Sendo um sistema aberto e configurável é passível de adaptar às necessidades exigidas no

laboratório, não esquecendo que grande parte dos ensaios realizados cumprem com os requisitos técnicos exigidos pelo Sistema de Gestão da Qualidade do IH. Nesse sentido o sistema LIMS foi adaptado e programado internamente permitindo não só a execução de ensaios acreditados, como satisfazer os parâmetros considerados como fundamentais aos tipo de dados a serem guardado em BD *Oracle*.

Uma das características fundamentais deste sistema é a sua funcionalidade, permitindo o controlo e a gestão laboratorial das amostras, desde a sua colheita até à saída dos resultados das análises laboratoriais.

A criação de campanhas de amostragem, a gestão do trabalho laboratorial com a criação de alíquotas setoriais e os resultados finais atribuídos às amostras são fatores prioritários na programação efetuada (Fig.1).



Fig. 1. Modelo de compilação de dados anteriores a 2009.

## 4. RECUPERAÇÃO DE DADOS ANTIGOS

Em 2012, já com o *Nautilus* em pleno funcionamento no laboratório de sedimentologia, considerou-se que era fundamental a passagem para a BD dos resultados das amostras colhidas no âmbito do Programa SEPLAT, uma vez que este projeto englobava uma amostragem de sedimentos, milha a milha, ao longo de toda a plataforma continental portuguesa, passível de ser atualizados com amostras adicionais ou processadas mais recentemente no âmbito de outros trabalhos e projetos. Em termos globais, a amostragem do Programa SEPLAT compreende cerca de 16 000 estações de colheita de amostras, cujos sedimentos haviam sido analisados no laboratório, nos setores da granulometria, mineralogia e carbono, utilizando diferentes técnicas e equipamentos.

Face à flexibilidade do NAUTILUS foi possível desenvolver uma programação específica que permitisse que a BD fosse alimentada com estes dados históricos e incluísse ainda toda a informação

administrativa associada às amostras analisadas passando a integrar a já existente BD da geologia/sedimentologia.

Porém, depois de compilar, validar e recuperar a informação analógica do programa SEPLAT, constatou-se haver muitos mais projetos que, embora mais pequenos que o SEPLAT, continham informação igualmente importante. Assim, após 4 anos a recuperar a informação do SEPLAT, avaliou-se a possibilidade de estender o desenvolvimento da BD a outros dados, tendo-se decidido continuar a alimentá-la até esgotar todos os dados granulométricos, de teor em carbono e mineralógicos que existissem apenas em registo analógico e fossem anteriores a 2009.

Com este objetivo, retomou-se todo o trabalho de busca e consulta de relatórios, folhas de bordo, registos laboratoriais, boletins de ensaio, ou outros documentos que permitissem adquirir a informação necessária para constar na BD. Procedeu-se a um novo desenvolvimento e programação para acesso à BD através do NAUTILUS, tendo sido considerados os parâmetros a seguir identificados:

Dados administrativos:

- Campanha: identificação do projeto, título, objetivo, descrição, data de início e fim de cruzeiro, navio, bibliografia;
- Amostra: nome da amostra, nome do cruzeiro, latitude, longitude, profundidade, data da colheita, hora da colheita, tipo de colhedor, descrição da amostra *in situ*, cor da amostra, preservação e embalagem, observações

Resultados:

- Amostra: frequências individuais, estatística (percentis, média, moda, assimetria, desvio padrão), teor em carbono orgânico total, teor em carbono inorgânico total, teor em carbono total, teor em carbonato, mineralogia (minerais de argila), método utilizado, equipamento utilizado, data de fim da análise, operador.

## 5. LIMS NAUTILUS: DESENVOLVIMENTO E PROGRAMAÇÃO

Para que as amostras fiquem corretamente identificadas, são atribuídos atributos de modo a que estes permitam identificar a amostra. Além dos atributos *standard*, como por exemplo a identificação externa, projeto, data de colheita, é importante associar as coordenadas geográficas. Foi assim desenvolvida uma extensão representativa dos dados geo-espaciais referentes às amostras colhidas pelo IH. Nesta extensão é permitido ao utilizador

preencher os campos referentes à longitude, latitude e o sistema geodésico de referência.

Uma vez que as amostras dos vários projetos são amostras de sedimentos cujos metadados são conhecidos, bem como as análises realizadas e resultados obtidos, o principal desafio foi adaptar e programar o sistema de modo a refletir as metodologias que se encontravam em vigor à data da obtenção dos resultados analíticos.

Estando todas as amostras destes projetos georreferenciadas, criaram-se *workflows* que refletissem os parâmetros e resultados/unidades das análises realizadas à imagem do que existe nas rotinas atuais, ou seja, foram criados os testes para as várias áreas, equipamentos, e programação que permitisse a inserção automática da informação. O desenvolvimento efetuado abrangeu áreas distintas, granulometrias, carbonos e mineralogia, e os testes refletem as metodologias utilizadas à época (Fig.2).



Fig. 2. Modelo Nautilus – Testes das diversas áreas.



Para minimizar a ocorrência do erro na introdução da informação e diminuir o tempo gasto pelo operador desenvolveu-se uma programação de modo a inserir automaticamente os resultados e também a metainformação da amostra (Fig.3). Para introdução automática da informação, o operador tem de criar ficheiros com extensão *.csv*, os quais refletem a informação/ dados analógica.

Entry Name	Command	Integer 1	Text	Text 2
test_array	Set Value			Complacaeo:Carbono
result_array	Set Value			CaCO3_Compilacao:
result_array	Add Value			CT_Compilacao
result_array	Add Value			CIT_Compilacao
result_array	Add Value			COI_Compilacao
result_array	Add Value			Metodo de Analise_Compilacao
result_array	Add Value			Equipamento_Compilacao
result_array	Add Value			Data de Analise_Compilacao
result_array	Add Value			Operador_Compilacao
	Stop Lines	1		
	Set Marker			
	Delete from Marker			
NEW GRID	Grid build from CSVs	0	:	
	Stop to blank Line			
	Delete from Marker			
aliquot_grid	Grid build from CSVs	0	:	
result_grid	Grid build from CSVs	0	:	
aliquot_ids	Grid get Column	1		aliquot_ids
	Grid delete Column	1		result_grid
todos	Grid get all Cells			result_grid

Entry Na	Command	Integer 1	Integer 2	Text 1	Text 2
	Use Instrument Worksheet	0	0		
	Find Test Name				test_array
	Set Aliquot List				aliquot_ids
	Store Results from Grid			result_array	result_grid

Fig. 3. Modelo Nautilus – Programação para inserção automática da informação.

Criou-se assim uma área onde são colocados os ficheiros a serem lidos pelo equipamento (pasta IN) e uma outra área na qual é guardado o *backup* dos dados introduzidos na BD, ficheiro com a extensão *.bak* (pasta OUT). Estes ficheiros, onde estão incluídas as diferentes variáveis para inserção dos resultados nas diversas áreas, são de dois tipos (Fig.4):

- Atributos da amostra;
- Ficheiros distintos para a inserção de resultados das diversas áreas.

As grandes vantagens da inserção automática da informação são:

- maior fiabilidade na transferência dos dados aquando da inserção dos mesmos;
- maior rapidez e facilidade na inserção dos dados.

```
CaCO3_Compilacao:CT_Compilacao:CIT_Compilacao:COI_Compilacao:
2017/01279:~:0,56:40,30:0,51;Espectrometria de Absorção IR:STR
2017/01280:25,74:4,24:3,09:1,15;Espectrometria de Absorção IR:
2017/01281:2,92:1,7:0,35:1,35;Espectrometria de Absorção IR:ST
2017/01282:15,99:2,68:1,92:0,77;Espectrometria de Absorção IR:

```

CaCO3_C	CT_C	CIT_C	COI_C	Metodo d	Equipamento_C	Data de Analise
2017/0074	15,97		1,92	-	Espectron STRONLON C-M	2004-02-4
2017/0074	15,97		1,92	-	Espectron STRONLON C-M	2004-02-4
2017/0074	14,88		1,79	-	Espectron STRONLON C-M	2004-02-4

Fig. 4. Modelo Nautilus – Exemplos dos ficheiros *.csv* e *.bak*.

## 6. CONSIDERAÇÃO FINAL

Ao longo dos anos o arquivo de dados científicos em BD permite às instituições, não só uma forma segura de armazenamento de dados de cariz técnico-científica, como o acesso rápido e consulta de dados.

A Divisão de Geologia Marinha do Instituto Hidrográfico sempre contribuiu para o conhecimento do mar e é reconhecida pelo importante espólio de informação geológica de que é detentora, nomeadamente na informação existente em registo analógico associados a cada campanha, amostra colhida e análises realizadas ao longo dos anos.

A utilização de um sistema de gestão laboratorial dinâmico permitiu uma programação e desenvolvimento de testes adaptados à introdução dos dados existentes anteriores a 2009.

O arquivo em BD *oracle* é uma mais-valia na consulta e cedência de dados para projetos de cariz técnico-científico, assim como para preservação dos dados ao longo dos tempos.

## AGRADECIMENTOS:

As autoras deste trabalho agradecem a todos os responsáveis técnicos e operadores de laboratório que diariamente produzem resultados de análises sedimentológicas, bem como a todos os utilizadores do sistema NAUTILUS.

## REFERÊNCIAS:

*Decreto-Lei* nº 43 177 I série – número 221 de 22 de setembro de 1960.

<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/INF-12000>.

# O Sistema Nacional de Informação Geográfica e a implementação da Diretiva INSPIRE em Portugal: situação atual e evolução prevista

P. Patrício (1), D. Furtado (1), H. Silva (1), V. Bica (1), A. Fonseca (1), A. L. Gomes (1), A. Serronha (1), M. Caetano (1)

(1) Direção-Geral do Território; [ppatricio@dgterritorio.pt](mailto:ppatricio@dgterritorio.pt).

**Resumo:** A Direção-Geral do Território, entidade responsável pela coordenação operacional do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG), decidiu fazer uma reorientação estratégica desta infraestrutura de informação geográfica. Esta reorientação envolveu uma reflexão sobre a utilização efetiva desta plataforma e a definição de uma visão para o SNIG para 2020 - SNIG2020. O SNIG desempenha duas funções fundamentais: permite o registo e a pesquisa de toda a informação geográfica produzida em Portugal e enquadra as atividades relacionadas com a implementação da Diretiva INSPIRE em Portugal. Neste momento está a decorrer o processo de reestruturação do Geoportal SNIG, que se enquadra nas linhas orientadoras definidas no Plano de Ação SNIG2020. Esta reestruturação pretende tornar este portal mais simples e intuitivo. Esta comunicação tem como principal objetivo fazer o ponto de situação da implementação da Diretiva INSPIRE em Portugal e apresentar os desenvolvimentos ocorridos nos últimos três anos em cumprimento do estabelecido na visão SNIG2020.

**Palavras-chave:** SNIG, Informação Geográfica, INSPIRE, Metadados.

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) desempenha duas funções essenciais: permite o registo e pesquisa de toda a informação geográfica produzida em Portugal e apoia a aplicação da Diretiva INSPIRE em Portugal.

No ano 2015 a Direção-Geral do Território (DGT) iniciou um processo de reorientação do SNIG. Este processo envolveu numa primeira fase a realização de um estudo de diagnóstico da situação atual, que consistiu na realização de uma consulta pública *online* aos utilizadores desta infraestrutura, que contou com a participação de mais de 500 respondentes (Tabela I), e na análise das monitorizações da aplicação da Diretiva INSPIRE em Portugal, que são promovidas pela Comissão Europeia (CE) e que decorrem anualmente desde o ano 2009 (Tabela II). Para além destas ações esta fase de diagnóstico incluiu ainda um processo de avaliação global do SNIG através da realização de uma análise SWOT que permitiu avaliar as várias vertentes do SNIG e perspetivar o que esta infraestrutura poderá vir a ser no futuro.

Na sequência do estudo de diagnóstico do SNIG, que permitiu caracterizar a situação atual desta infraestrutura, a DGT realizou ainda uma discussão pública através de um evento designado por *blue sky thinking* estruturado. Este encontro contou com a participação de cerca de 50 convidados provenientes da administração pública, da academia, de centros de

investigação e do sector privado, e teve como principal objetivo discutir o futuro do SNIG e definir uma visão do SNIG para o ano 2020 - SNIG2020.

O SNIG2020, uma visão para o SNIG para 2020, foi construído por processos colaborativos e participativos e resultou de um amplo debate nacional sobre o que se espera da infraestrutura nacional de informação geográfica a médio prazo, tendo sido aprovada pelo Conselho de Orientação do SNIG (CO-SNIG) em dezembro de 2015.

Após a publicação do documento SNIG2020, e com o objetivo de materializar e pôr em prática esta visão, foi elaborado um documento designado por Plano de Ação SNIG2020 - Princípios Orientadores. Este plano de ação identifica um conjunto de atividades de caráter político, institucional, administrativo e técnico que terão que ser desenvolvidas por todas as entidades envolvidas na coordenação, na manutenção e na exploração do SNIG. Este documento de princípios orientadores foi aprovado pelo CO-SNIG no início de 2016, enquanto entidade responsável pela coordenação estratégica do SNIG.

Tabela I. Consulta pública online aos utilizadores sobre o SNIG (fonte: Consulta pública sobre o SNIG [http://snig.dgterritorio.pt/Inspire/documentos/SNIG2020/consulta\\_publicaINSPIRE\\_SNIG.pdf](http://snig.dgterritorio.pt/Inspire/documentos/SNIG2020/consulta_publicaINSPIRE_SNIG.pdf)).

Sector de trabalho	Num. de respondentes	
	Valores absolutos	%
Administração Pública	282	56
Ensino Superior/Investigação	123	24
Entidade Privada	65	13
Empresa Pública	15	3
Organização Não Governamental (ONG)	12	2
Ensino Básico e/ou Secundário	8	2
<b>Total</b>	<b>505</b>	<b>100</b>

Tabela II. Indicadores globais de Monitorização INSPIRE 2009 - 2017.

Indicador	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Metadados</b>									
MDi1: Existência	68%	94%	95%	95%	86%	89%	100%	100%	100%
MDi2: Conformidade	54%	92%	94%	93%	57%	88%	100%	100%	100%
<b>CDG (Conjuntos de dados Geográficos)</b>									
DSi2: Conformidade	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	26%	24%
<b>Serviços de Dados Geográficos</b>									
NSi1: Metadados no SNIG	51%	79%	80%	80%	50%	88%	100%	100%	100%
NSi2: CDG -serviços (visualização e descarregamento)	19%	11%	11%	11%	6%	3%	6%	25%	47%
NSi4: Conformidade	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	30%	38%

## 2. A DIRETIVA INSPIRE

A Diretiva europeia INSPIRE foi inicialmente transposta para a ordem jurídica nacional através do Decreto-Lei n.º 180/2009, de 7 de agosto. No início de 2017 este diploma, que entretanto tinha sido atualizado pelo Decreto-Lei n.º 84/2015, de 21 de maio, foi alterado pelo Decreto-Lei n.º 29/2017, de 16 de março. Esta alteração teve como objetivo inicial responder aos requisitos que a CE considerou necessários para uma transposição correta da Diretiva INSPIRE. Um dos requisitos mais relevantes foi a necessidade de inclusão do teor dos Anexos INSPIRE no próprio texto da legislação nacional, o que na transposição inicial não tinha sido considerado como relevante. A DGT, como entidade coordenadora nacional do SNIG e Ponto Focal para a Diretiva INSPIRE, foi responsável pela preparação deste processo de revisão, desenvolvido em colaboração com as entidades que integravam o CO-SNIG neste período. Esta revisão definiu ainda a forma de articulação do SNIG com as infraestruturas de informação geográfica temáticas, regionais ou locais e expandiu a composição do CO-SNIG. O alargamento deste órgão teve como principal

objetivo envolver na coordenação do SNIG todas as entidades da administração pública central que produzem informação geográfica que se enquadra nos 34 temas dos três anexos definidos pela Diretiva INSPIRE.

A aplicação da Diretiva INSPIRE em Portugal, que ocorre desde o ano 2009, é monitorizada de forma regular através do cálculo de diversos indicadores que são aprovados pelo CO-SNIG e submetidos à CE anualmente no mês de maio (Tabela II). A cada três anos é ainda elaborado um relatório que faz uma análise mais descritiva e analisa um conjunto de aspetos mais específicos definidos em cada ano pela CE.

Ao longo dos anos tem sido realizado um esforço considerável por parte de todas as entidades na produção de indicadores para cada monitorização. Para a monitorização 2016 foram introduzidas alterações significativas na metodologia de monitorização, uma vez que este procedimento passou a ser realizado diretamente através da análise dos registos de metadados do catálogo SNIG que incluem a palavra-chave INSPIRECORE. Esta nova abordagem exigiu o desenvolvimento de um aplicativo para permitir a recolha da informação necessária diretamente a partir dos metadados do SNIG, usando a palavra-chave referida. Depois de introduzir estes dados no formulário EIONET - European Environment Information and Observation Network, os dados de monitorização da Diretiva INSPIRE foram submetidos através de um ficheiro XML.

A forma como a aplicação da Diretiva INSPIRE tem vindo a ser realizada em Portugal também sofreu alterações ao longo dos anos. Para além da produção de vários documentos técnicos, resultado de numerosos debates e discussões, e com vista a criar condições em Portugal para a aplicação efetiva da Diretiva INSPIRE, foram dinamizados vários grupos de trabalho já existentes, reativados outros cuja atividade tinha sido interrompida e criados novos grupos de modo a acompanhar de forma sistemática todas as temáticas relacionadas com a Diretiva INSPIRE. Neste domínio merecem destaque os GTI-Temáticos e o GTI-Transversal que têm desempenhado um papel determinante no envolvimento de todos os técnicos das várias entidades da administração pública central.

Nos últimos anos foram realizadas várias ações de formação que permitiram dotar os técnicos da administração pública e das empresas de conhecimentos tecnológicos sobre as matérias relacionadas com a produção, exploração e gestão de informação geográfica, em cumprimento das regras definidas pela Diretiva INSPIRE. Foram realizados vários *workshops* sobre criação de serviços de dados geográficos e sobre a forma de harmonizar a informação geográfica de acordo com as especificações técnicas dos vários temas INSPIRE.

A análise dos indicadores de monitorização INPIRE dos últimos anos (Tabela II) permite concluir que Portugal tem vindo gradualmente a aplicar de forma mais sustentada esta diretiva europeia.

Neste momento a informação geográfica em Portugal está mais acessível e respeita normas e regras que tornam a sua utilização mais simples, intuitiva e adequada à forma como atualmente se utiliza a informação geográfica, nomeadamente com a promoção do *consumo* de informação geográfica através de serviços de dados geográficos de visualização e descarregamento (e.g. serviços WMS – Web Map Service e WFS- Web Feature Service).

O cumprimento das regras definidas pela Diretiva INSPIRE depende do envolvimento das várias entidades nacionais produtoras de informação geográfica. Apenas com o empenhamento institucional destes organismos e com a participação ativa dos técnicos destas entidades será possível responder de forma positiva aos desafios colocados por esta diretiva europeia. Um acesso mais simples à informação geográfica, preconizado por esta diretiva, possibilitará uma utilização mais efetiva dos dados geográficos do território e permitirá que a informação geográfica constitua um fator determinante para o desenvolvimento nacional.

### 3. GEOPORTAL SNIG

A visão SNIG2020 e os princípios orientadores do respetivo Plano de Ação definiram como fundamental a criação de um novo portal de internet para o SNIG. Nestes documentos ficou definido que deveria ser desenvolvida uma infraestrutura de informação geográfica em que a pesquisa de conjuntos e serviços de dados geográficos fosse simples, intuitiva e eficiente e em que os resultados ficassem ordenados de acordo com critérios de relevância adequados. Uma infraestrutura de informação geográfica com geovisualizadores e catálogos de metadados de informação geográfica que permitissem navegar no tempo e no espaço de forma simples, intuitiva e eficiente. Ficou ainda definido que esta infraestrutura deveria ser desenvolvida em software livre e de código aberto, assegurando que a pesquisa de informação geográfica nesta plataforma decorresse de forma eficiente e adaptada às necessidades atuais dos utilizadores.

Neste sentido, em janeiro de 2018 foi iniciado um processo de reestruturação do atual portal do SNIG. O novo geoportal do SNIG estará disponível no final de 2018 e permitirá dar resposta aos principais desafios que foram identificados por todos os utilizadores desta infraestrutura de informação geográfica.

### 4. CONCLUSÃO

O novo geoportal do SNIG irá contribuir para que o acesso à informação geográfica em Portugal decorra de forma mais simples para os utilizadores mais profissionais mas também para os cidadãos em geral. A principal característica deste geoportal será garantir que todos os que em determinado momento necessitam de conhecer e aceder à informação geográfica existente para um determinado local do território, o possam fazer de forma intuitiva e eficiente através desta infraestrutura de informação geográfica.

## IPSentinel - Infraestrutura portuguesa para armazenamento e disponibilização de imagens Sentinel

M. Silva (1), P. Patrício (1), B. Anjos (2), M. Silva (2), C. Pimentel (2), I. Girão (1) e M. Caetano (1)

- (1) Direção-Geral do Território. marisas@dgterritorio.pt  
 (2) Instituto Português do Mar e Atmosfera

**Resumo:** A Direção-Geral do Território e o Instituto Português do Mar e Atmosfera disponibilizam desde abril de 2017 uma Infraestrutura Portuguesa para dados Sentinel - IPSentinel. Esta infraestrutura é uma via de acesso privilegiado aos dados dos satélites Sentinel para o território português e para a área de busca e salvamento no Atlântico sob a responsabilidade de Portugal. O desenvolvimento da infraestrutura IPSentinel foi viabilizado através de um projeto homónimo promovido pela Direção-Geral de Política do Mar através do Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu.

A implementação da infraestrutura portuguesa permite um acesso livre e imediato aos dados Sentinel, nomeadamente através da Estação de Santa Maria, que se configura como um recetor privilegiado dessa informação pela sua localização estratégica.

A disponibilização de imagens de forma rápida, gratuita e sistemática permitirá a criação de novos produtos e serviços que certamente constituirão instrumentos indispensáveis na gestão do território e dos seus recursos.

**Palavras-chave:** Portugal, IPSentinel, Sentinel, Observação da Terra, Detecção Remota, Copernicus, ESA, Segmento de Solo Colaborativo, CollGS.

### 1. INTRODUÇÃO

No presente, a informação geográfica é considerada como que um bem adquirido. Para além do seu papel nas instituições de planeamento e gestão do território, constitui também um fator decisivo no crescimento da economia. O progresso nesta área é contínuo e permanente, em particular na área de Observação da Terra (OT) onde os satélites se distinguem como fonte de informação atualizada e de qualidade. Neste cenário e dedicado à temática de OT, a União Europeia criou o Programa Copernicus<sup>1</sup>. Este Programa desenvolve-se em várias frentes e apresenta como componentes principais o Espaço, *InSitu* e Serviços.

Portugal participa ativamente neste programa, nomeadamente no Segmento de Solo Colaborativo (CollGS) que integra a componente Espaço, e conta desde 2017 com uma infraestrutura nacional que permite o armazenamento e disponibilização de imagens Sentinel – IPSentinel. Esta concretização foi resultado de uma parceria entre a Direção-Geral do Território (DGT) e o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e contou para além do financiamento nacional com o Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu (EEA Grants), num programa operado pela Direção-Geral de Política do Mar (DGPM). Este programa de

financiamento contribuiu ainda de forma significativa para a adaptação da Estação de Santa Maria, nos Açores, como recetor de imagens Sentinel 1 (missão radar), constituindo-se assim um acesso privilegiado desta informação para a IPSentinel.

*Fig. 1. Área de interesse da IPSentinel (tracejado vermelho) que compreende o Território português, a sua Zona Económica Exclusiva (ZEE), a área da Extensão da Plataforma Continental. A verde está representada a área de visibilidade da Estação recetora de Santa Maria.*



A infraestrutura IPSentinel disponibiliza imagens para uma vasta área geográfica que se estende para lá das Zona Económica Exclusiva e da Extensão da Plataforma Continental, incluindo a zona do

<sup>1</sup> Regulamento (EU) No377 / 2014 do Parlamento Europeu e do Conselho de 3 Abril de 2014

Atlântico onde a busca e salvamento são da responsabilidade de Portugal.

Esta infraestrutura pretende ser um contributo efetivo na exploração dos dados das missões Sentinel, quer no seio académico, quer na administração do Estado, quer no setor empresarial.

## 2. ENQUADRAMENTO

O Programa Copernicus apresenta três componentes distintas: Espaço, *InSitu*, e Serviços. A componente Espaço prevê a aquisição, pré-processamento e disponibilização de dados obtidos a partir de sensores instalados em satélites. Combina dois tipos de missões:

- Missões dedicadas – Satélites Sentinel (Sentinel 1, 2, 3, 4, 5 e 5P, 6 e Jason CS) criados e operados no âmbito do Programa;
- Missões contributivas – Satélites operados por outras organizações que adquirem informação considerada relevante para o Programa;

De momento, encontram-se já em órbita os satélites Sentinel 1A e 1B, 2A e 2B, 3A e 3B (lançado a 25 de Abril de 2018) o que permite um tempo de revisita singular, tendo em conta as características destas missões.

O suporte às missões dedicadas é garantido pelo CollGS, que intervém na fase de operações de voo, na aquisição de dados e no seu processamento, arquivo e distribuição. É composto por diversas estações receptoras, onde se inclui a Estação de Santa Maria, nos Açores, e por diversos nós de acesso (*Hubs*), nomeadamente os *National Mirrors*.

A infraestrutura IPSentinel foi desenhada de acordo com os requisitos dos *National Mirrors*. Estas infraestruturas pretendem constituir-se como pontos de acesso privilegiado de todo o manancial de informação geográfica de qualidade disponibilizada pelos satélites Sentinel. Esta informação confere um amplo suporte em áreas diversas como a proteção ambiental, planeamento e gestão do território, agricultura, pesca e floresta, saúde, transportes, desenvolvimento sustentável, alterações climáticas, proteção civil, entre outras. É um contributo para suporte nas decisões e na definição de políticas (EU, Termos e Condições para o Uso e Distribuição de Dados Sentinel).

As grandes vantagens da IPSentinel relativamente ao Scientific Data Hub (nó de acesso da ESA) são, para além da estabilidade do seu desempenho, a velocidade média de *download* cerca de três vezes superior e, talvez a mais singular, o acesso direto à Estação de Santa Maria, nos Açores. Esta ligação permite a aquisição de produtos Sentinel 1 num tempo recorde: 19 a 32 minutos em vez de 4 a 13 horas. Esta particularidade pode marcar a diferença num cenário de emergência.

É importante referir que toda a informação presente na IPSentinel é disponibilizada de forma gratuita.

## 3. ARQUITETURA E FUNCIONALIDADES

O propósito das infraestruturas como a IPSentinel (*National Mirrors*) é garantir acesso às imagens Sentinel de forma simples, rápida e sem custos.

A implementação da infraestrutura nacional esteve a cargo da empresa EDISOFT e assentou na adaptação do *software* Data Hub (DHuS), desenvolvido pelo consórcio Serco-Gael para a ESA. Este *software* disponibiliza uma interface simples que pode ser usada de forma interativa ou por protocolos OData<sup>2</sup>, através de *scripts* que permitem ao utilizador uma integração automática destes dados no seu fluxo de trabalho.

O acesso à infraestrutura IPSentinel apresenta-se ao utilizador através de uma página de Internet onde podem ser consultadas algumas informações estruturais e de contexto, nomeadamente sobre o programa Copernicus e a Estação de Santa Maria. Em pano de fundo encontram-se: o servidor *Front-End* IPSentinel, o IPSentinel *Rolling Archive*, e os servidores dedicados a produtos derivados. No servidor *Front-End* estão instaladas as funções de *WebServer*, o *software* DHuS e todos os *scripts* para ingestão e compatibilização de produtos quer do repositório ESA quer da Estação de Santa Maria.

Foram estabelecidos dois perfis de utilizadores: o Administrador com acesso às operações de gestão da plataforma e o Utilizador Regular com acesso a todas as funcionalidades de pesquisa, *download* e uma área própria onde pode guardar as suas pesquisas e reutilizá-las em qualquer momento. Cada utilizador poderá executar um máximo de dois *downloads* em simultâneo.

A segurança da ligação cliente-servidor e da transmissão dos dados foi assegurada pelo estabelecimento de uma estrutura de rede baseada no modelo OSI. Existe uma *firewall* que garante a segurança das bases de dados e das ligações entre as diversas máquinas. Foram considerados os protocolos de comunicação que asseguram autenticação, a privacidade e integridade na troca de informação (e.g. HTTPS).

Em termos de integridade do sistema, estão asseguradas cópias regulares da base de dados bem como um sistema de *backup* para os ficheiros mais importantes da máquina IPSentinel *Server*. Foi também implementado um sistema de *High Availability* que assegura uma disponibilidade permanente do portal IPSentinel.

<sup>2</sup> O Protocolo Open Data (OData) é baseado no protocolo de transferência HTTP/REST, usável por diversas aplicações como *cURL* ou *wget*.

#### 4. INTERAÇÃO COM AS IDE

Desde o primeiro momento que houve uma preocupação não só com os dados Sentinel mas também com os produtos e serviços derivados. Ao longo do processo de implementação tornou-se consensual a ideia de que esses produtos deveriam ter um registo numa Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE) nacional como o SNIG ou outras de âmbito temático como o SNIMar ou SNIAmb. Estas IDE são baseadas nos catálogos de serviços para WEB (CSW) da Open Geospatial Consortium (OGC). A implementação na IPSentinel é feita através da integração da interface ETL (Extract, Transform, Load) no *software* DHuS, que converte as pesquisas OGC CSW em resultados OData. Desta forma o utilizador pode usar o mesmo ambiente para executar a sua pesquisa no catálogo IPSentinel ou numa das IDE.

#### 5. DADOS ESTATÍSTICOS

A infraestrutura IPSentinel encontra-se em pleno funcionamento desde abril de 2017 e conta com cerca de 300 utilizadores registados. De momento a capacidade instalada é de 35 TB que permitem armazenar cerca de um mês e meio de produtos para *download*. Neste volume 67% corresponde a imagens Sentinel 1, 28% a imagens Sentinel 3 e 5% a imagens Sentinel 2.

As caracterizações dos utilizadores por domínio de interesse e área de aplicação apresentam-se nas tabelas seguintes.

Tabela 1. Utilizadores por domínio de interesse.

Domínio de interesse	Utilizadores registados (%)	Volume de dados (GB)	Download (%)
Atmosfera	6,08	37,80	4,01
Clima	3,38	2,67	1,22
Emergência	6,76	20,72	4,53
Terra	56,76	302,95	55,40
Mar	8,78	22,85	6,79
Segurança	3,71	32,59	5,75
Outros	14,53	125,23	22,00
Total	100,00	544,81	100,00

Tabela 2. Utilizadores por área de aplicação.

Área de aplicação	Utilizadores registados (%)	Volume de dados (GB)	Download (%)
Comercial	5,07	41,43	7,14
Educação	14,19	50,40	11,67
Investigação	61,15	319,64	55,05
Outros	19,59	133,34	26,14
Total	100,00	544,81	100,00

#### 6. CONCLUSÃO

A materialização da infraestrutura IPSentinel foi concretizada com sucesso, prova disso são os números apresentados. Os mesmos números apontam para um caminho ainda a percorrer que permita que a utilização desta informação transponha o seio académico e seja potenciada pelo sector empresarial. Esta infraestrutura pretende ser um meio para essa realização, promovendo a utilização de imagens Sentinel.

Importa ter presente que a infraestrutura IPSentinel resulta de um bom exemplo de colaboração institucional entre a DGT e o IPMA. Estas parcerias são cruciais para que a partilha de conhecimento seja efetiva e para cimentar as boas relações institucionais que a potenciam.

Naturalmente que manter uma infraestrutura desta natureza se reveste de desafios. Talvez o maior seja neste momento o crescente volume de produtos provenientes dos satélites já operacionais (6) e os que estão programados para o futuro próximo (Sentinel 4, 5 e 6). Para além desta questão e também por ela condicionada há o compromisso de manter o reconhecido desempenho da infraestrutura. Os parceiros estão atentos a estes desafios e de certa forma confiantes de que uma comunidade sólida de utilizadores demonstre a importância deste serviço. A IPSentinel só existe para servir.

#### Agradecimentos

Os resultados são o resultado do trabalho de uma equipa que participou de forma entusiástica para a concretização deste projeto. Obrigada.

#### REFERÊNCIAS

- Caetano, M., Brás, T. (2014) Satélites e serviços do programa Copernicus. Lisboa: Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).
- Caetano, M. et al. (2015) IPSentinel: Desenvolvimento de uma plataforma colaborativa para a disseminação de informação geoespacial em Portugal. VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, 1-8.
- Collaborative Ground Segment, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/ground-segment/collaborative>.
- Copernicus, <http://www.copernicus.eu/>.
- ESA (2014) Data Hub Service. Software Manual,
- ESA (2014) Data Hub Service. Architectural Design Document.
- European Commission: Terms and Conditions for the Use and Distribution of Sentinel Data ESA, 2014.

- European Space Agency, <http://www.esa.int/ESA>.
- Guia Rápido. Lisboa: Direção-Geral do Território, 2017.
- Guia, Sabrina. Especificação de Testes (STD-ATD). Paço de Arcos: EDISOFT, 2017.
- Sentinel Data Access,  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>.
- Regulation (UE) n°377/2014 of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 establishing the Copernicus Programme.
- Rosa, J. (2017). Administration Manual (AM) IPSENTINEL. Paço de Arcos: EDISOFT.
- Rosa, J. (2017). Interface Control Document (ICD). Paço de Arcos: EDISOFT.
- Rosa, J. (2017). Manual de Utilizador (UMD) IPSENTINEL. Paço de Arcos: EDISOFT.
- Rosa, J. (2017). Software Design Description (SDD) IPSENTINEL. Paço de Arcos: EDISOFT.



## Análise multicritério para apoio à decisão em intervenções de obras marítimo-portuárias: estudo de quebra-mares de talude

R. Giollo (1, 2), M.J. Silva (1, 2), R. Lemos (2) e P. Couto (2)

(1) Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias (ULHT), rbgiollo@gmail.com

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

**Resumo:** Os quebra-mares de talude estão entre as obras de proteção marítimo-portuárias mais frequentes em Portugal. Devido ao ambiente marítimo agressivo a que estão sujeitos, requerem obras de manutenção periódicas que garantam o seu funcionamento adequado.

O elevado valor associado às reparações e/ou reabilitações e às grandes dimensões dos quebra-mares, muitas vezes inviabilizam que intervenções em estruturas desta natureza sejam realizadas de forma completa.

Realizou-se um estudo de análise multicritério, com objetivo de propor critérios a serem utilizados na metodologia *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* (MACBETH), acrescida de informações técnicas da base de dados da aplicação de Análise de Observação Sistemática de Obras Marítimas (ANOSOM), com a intenção de otimizar o impacto dos investimentos e auxiliar a tomada de decisões quanto a priorização de intervenções diretamente relacionadas com a maximização da vida útil dos quebra-mares e o seu correto funcionamento. Os casos de estudo são os quebra-mares de Vilamoura, Quarteira e Faro-Olhão.

**Palavras-chave:** Análise multicritério, Quebra-mares de talude, Obras de proteção marítimo-portuárias.

### 1. INTRODUÇÃO

Portugal Continental possui um posicionamento estratégico privilegiado por se encontrar no cruzamento das principais rotas equatoriais e meridionais de tráfego marítimo, num eixo de ligação ímpar entre três continentes, nas direções E-W e N-S, além de uma das maiores Zonas Económicas Exclusivas do mundo, com cerca de 200 milhas marítimas (ENM2013-2020).

Assim, o país apresenta condições únicas para a instalação de portos, proporcionadas pela sua localização geográfica e grande extensão da costa.

No ano de 2017, os portos portugueses registaram o maior movimento de carga da sua história, com valores próximos das 89 milhões de toneladas, uma variação positiva de 3,9% em relação ao período homólogo do ano anterior (AMT, 2017).

Num mundo cada vez mais globalizado, como o atual, os portos têm para a economia, não só o papel fundamental como plataformas de entradas e saídas de produtos, mas, mais recentemente, também a náutica de recreio e o turismo marítimo (cruzeiros) passam a ter uma importância crescente.

Quer se trate de um porto de grandes dimensões, quer se trate de portos destinados a atividade de pesca, de recreio e marinas com função de albergar atividade turística náutica ou áreas de lazer para banhistas, é importante que se criem condições seguras, em termos de agitação marítima, para a prática de todas as atividades anteriormente citadas.

Como solução para o problema da agitação marítima que atinge a costa e com a intenção de proporcionar um ambiente adequado às práticas portuárias ou de recreio, constroem-se obstáculos estruturais como quebra-mares, esporões, paredões e molhes, capazes de amenizar os impactos do mar sobre a costa.

De acordo com um estudo realizado para o Sistema de Administração do Recurso Litoral (SIARL), entre os anos de 1995 e 2014, foram investidos em obras de defesa costeira, em Portugal Continental, cerca de 196 milhões de euros (Silva, 2014).

A decisão sobre a melhor forma de gerir o investimento destinado a obras de reparação e/ou reabilitação de estruturas importantes para a defesa costeira, como o caso dos quebra-mares, é facilitada quando se tem o auxílio de uma análise multicritério, capaz de simultaneamente, ter em consideração parâmetros de ordem técnica (como fatores de risco e impactos das reparações na vida útil da estrutura) e critérios socioeconómicos (custos, importância turística e comercial do porto).

### 2. QUEBRA-MARES DE TALUDE

Por definição um quebra-mar, na sua conceção mais geral, é qualquer obstáculo à propagação normal de ondas de gravidade geradas pelo vento sobre uma superfície de água (Cruz, 1969).

Atualmente, com projetos cada vez mais exigentes em termos de segurança e devido à evolução dos

métodos construtivos e dos materiais, pode-se atender as necessidades de execução de proteção a portos mais expostos a agitação marítima.

O dimensionamento de um quebra-mar é condicionado principalmente pela altura da maior onda de projeto identificada, para a qual a estrutura deve resistir, principalmente através do seu manto resistente (Correia, 2009), mas também dependerá do tipo de fundação, da profundidade da água, da maré, da disponibilidade, custo e transporte de materiais e ainda dos equipamentos disponíveis (Pita, 1985).

Simplificadamente, um quebra-mar é uma estrutura com grande desenvolvimento linear e de secção trapezoidal. Possui um perfil-tipo característico, identificado na Figura 1, podendo apresentar algumas variações ao longo da estrutura, consoante as condições a que estiver sujeito (principalmente a fisiografia dos fundos e a agitação incidente).

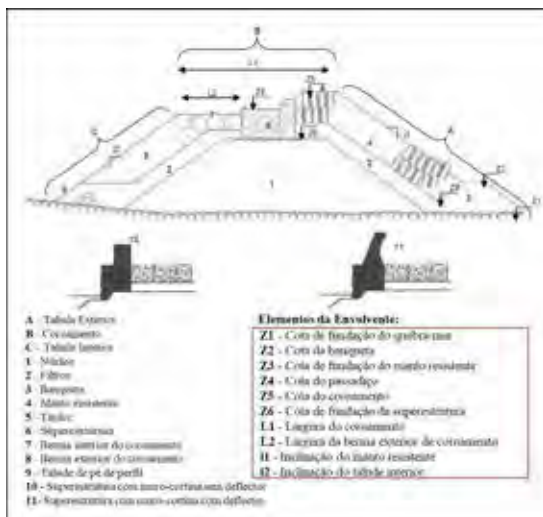


Fig. 1. Elementos do perfil-tipo de um quebra-mar de talude (adaptado de Lemos & Santos, 2007).

Os quebra-mares portugueses não apresentam grande variabilidade quanto ao tipo de blocos utilizados para a proteção dos mantos. Além dos tradicionais enrocamentos, as geometrias de blocos artificiais de betão armado mais recorrentes no país são os blocos paralelepípedicos, blocos cúbicos Antifer e os tetrápodos (Teixeira, 2012).

### 3. PROGRAMA ANOSOM

A aplicação informática de Análise de Observação Sistemática de Obras Marítimas (ANOSOM), desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), monitora, por meio de inspeções visuais, 36 estruturas marítimas de proteção portuária e de embocaduras, situadas ao longo de 19 pontos da costa (Lemos *et al.*, 2016).



Fig. 2. Localização das estruturas de proteção portuária e embocaduras monitoradas pelo ANOSOM (Lemos *et al.*, 2016).

As inspeções, que possuem periodicidade normalmente anual, caracterizam cada um dos troços em que a estrutura é previamente dividida. A avaliação da estrutura é feita através da caracterização do seu: i) Estado Atual; ii) Estado de Evolução e iii) Estado de Risco. O resultado da análise de cada troço gera relatórios para cada um dos quebra-mares, com o diagnóstico do estado da estrutura, bem como as necessidades de operações de intervenções de manutenção ou de medidas suplementares de inspeção (Lemos *et al.*, 2014).

Para além da função de armazenamento de dados recolhidos nas inspeções visuais, a aplicação também permite registar a evolução de cada componente da estrutura em análise, tendo por base uma data de referência, com o objetivo de dinamizar o diagnóstico de eventuais necessidades de intervenções na estrutura (Silva e Lemos, 2005).

O estado de um elemento do perfil inspecionado resulta da média ponderada das classificações atribuídas numa inspeção aos diferentes itens do elemento, posteriormente traduzidas numericamente com a utilização de uma tabela, previamente definida pelos técnicos responsáveis. Dos resultados das inspeções é possível a elaboração de relatórios onde se apresentam o estado das estruturas, a sua evolução e o índice de risco, que permitem selecionar as estruturas que devem ser intervencionadas (Silva e Lemos, 2005).

### 4. ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A AM é utilizada como instrumento de apoio na tomada de decisões em análises comparativas de projetos alternativos ou medidas heterogêneas, auxiliando os responsáveis pela tomada de decisões a integrarem diferentes opções nas suas ações,

fazendo com que a decisão tomada reflita as opiniões dos atores envolvidos num quadro prospetivo ou retrospectivo. Através desta técnica, simultaneamente, diversos critérios podem ser tidos em conta com o propósito de dar resposta a problemas complexos. Os resultados de uma análise multicritério são geralmente orientações para decisões de natureza operacional, recomendações para ações futuras ou ainda conclusões a respeito de priorização de ações (Bana e Costa *et al.*, 2004).

Uma análise multicritério deve ter em conta (Belderrain e Silva, 2005): i) Definição das alternativas; ii) Definição dos critérios relevantes para o problema de decisão; iii) Avaliação das alternativas em relação aos critérios; iv) Avaliação da importância relativa de cada critério e v) Avaliação global de cada alternativa.

#### 4.1. Metodologia MACBETH

A metodologia *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* (MACBETH) traduz um método de apoio à decisão que permite avaliar opções tendo em conta múltiplos critérios (Bana e Costa *et al.*, 2013).



Fig. 3. Fases do processo MACBETH de apoio à decisão (Bana e Costa, *et al.*, 2013).

Diferencia-se de outros métodos semelhantes de análise multicritério por basear a ponderação dos critérios e a avaliação das opções segundo julgamentos qualitativos sobre diferenças de atratividade, ou seja, para cada duas opções A e B, a diferença de atratividade entre elas pode ser julgada como sendo: i) Nula; ii) Muito fraca; iii) Fraca; iv) Moderada; v) Forte; vi) Muito forte; ou vii) Extrema (Bana e Costa *et al.*, 2013).

#### 4.2. Aplicação M-MACBETH

É uma aplicação informática utilizada para verificar de forma automática a consistência dos julgamentos atribuídos. No caso de uma inconsistência ser detetada o *software* identifica a origem do problema, o menor número de mudanças necessárias para solucioná-lo e fornece também outras sugestões de alterações que proporcionem consistência. A partir de uma matriz de julgamentos consistentes, o M-MACBETH propõe uma pontuação para cada opção. Estas pontuações formam a escala de base (Bana e Costa *et al.*, 2013).

## 5. CRITÉRIOS UTILIZADOS NA ANÁLISE

Inicialmente identificaram-se 6 grupos de objetivos (A até F), tidos em consideração em ações de intervenções em quebra-mares de talude, aos quais estão associados a si critérios posteriormente utilizados para julgamento:

#### A) Minimizar o risco estrutural

- Percentagem de área afetada pelo dano no troço considerado;
- Volume erodido por unidade de comprimento no troço considerado;
- Possibilidade de progressão do dano;
- Impacto do dano no troço considerado em comparação com a totalidade do quebra-mar.

#### B) Garantia das operações portuárias

- Estado de operacionalidade do quebra-mar.

#### C) Qualidade do aspeto visual e uniformidade

- Nível de irregularidades, em termos visuais, identificáveis no troço considerado.

#### D) Minimizar os custos de intervenções

- Maximizar as relações de custo-benefício das intervenções no troço considerado.

#### E) Objetivos de caráter social

- Trabalhadores diretamente dependentes do funcionamento do quebra-mar (pescadores, atividades náuticas e turismo).

#### F) Objetivos de caráter relacionado com alterações climáticas

- Imprevisibilidade de eventos extremos;
- Degradação de materiais devido ao aumento da amplitude térmica;
- Importância da subida do nível médio do mar.

## 6. CASO DE ESTUDO

A metodologia indicada foi aplicada aos quebra-mares existentes em Vilamoura, Quarteira e Faro-Olhão, por serem representativos de quebra-mares que dão abrigo a portos de pesca e de recreio em âmbito nacional.

Foram já desenvolvidas algumas análises preliminares dos quebra-mares indicados, recorrendo à aplicação M-MACBETH. Os resultados obtidos encontram-se em fase de desenvolvimento de análise de sensibilidade e de robustez, bem como de análises de custo-benefício com base em simulações de investimentos e preços médios, para as diferentes necessidades e formas de intervenção.

Os resultados obtidos permitem perspetivar uma tendência de empreender ações de intervenções em

troços com maior representatividade para a estabilidade geral da estrutura, pela sua importância, bem como na cabeça do quebra-mar, por estar mais exposta à agitação marítima. Para as duas situações indicadas, a razão da escolha prende-se com o facto de serem atribuídos elevados valores de coeficientes de ponderação atribuídos ao critério *impacto do dano no troço em comparação com a totalidade do quebra-mar*.

## 7. CONCLUSÕES

Uma análise multicritério pode ser aplicada na resolução de problemas complexos, auxiliando à tomada de decisões pelo decisor e ainda é uma importante mais-valia na própria estruturação e entendimento do problema em causa.

O programa ANOSOM representa uma ferramenta bastante completa, que regista informações técnicas detalhadas das estruturas monitorizadas.

A metodologia MACBETH mostrou-se a mais adequada para solucionar o problema de priorização de ações sobre a manutenção de quebra-mares, tendo como maior dificuldade a determinação dos critérios relevantes a serem tidos em consideração nas avaliações. O processo de análise para a tomada de decisão torna-se mais complexo à medida que se acrescentam critérios.

O *software* contribuiu de maneira significativa nos casos de deteção de incoerências nos julgamentos de atratividade, colaborando assim para a sua resolução. No mesmo sentido, as análises de sensibilidade e robustez provenientes do M-MACBETH são capazes de validar o modelo proposto.

Os dados obtidos através da aplicação da metodologia aos casos de estudo de quebra-mares de talude serão a base para a elaboração de uma dissertação de mestrado, com o mesmo título da presente comunicação, que está a ser desenvolvida no âmbito do protocolo existente entre a ULHT e o LNEC.

## REFERÊNCIAS

- AMT (2017). Autoridade da Mobilidade e dos Transportes (AMT). *Acompanhamento do Mercado Portuário*. Relatório de Dezembro de 2017.
- Bana e Costa C.A., Chagas, M.P. (2004). *A career choice problem: an example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments*. European Journal of Operational Research, 2004, vol. 153, no. 2, pp. 323-331.
- Bana e Costa, C.A., Meza, L.A., Oliveira, M., D. (2013). *O Método MACBETH e Aplicação no Brasil*. ENGEVISTA, V. 15, n. 1. p. 3-27, abril 2013.
- Belderrain, M. C. N. e Silva, R. M. (2005) Considerações sobre Métodos de Decisão Multicritério. Em: *XI Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ENCITA)*. São José dos Campos. Brasil. Anais do XI ENCITA, 2005. v. 1. p. 1-7.
- Correia, N.F.R. (2009). *Soluções alternativas para o prolongamento de quebramares de taludes Caso de estudo: Molhe Norte do Porto da Figueira da Foz*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cruz, D.V. (1969). *Generalidades sobre quebramares tradicionais. Particularidades sobre quebramares de taludes*. Memória nº38. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- ENM 2013-2020. *Estratégia Nacional Para o Mar*. Direção Geral de Política do Mar (DGPM).
- Lemos, R., Silva, J., Fortes, C., Reis, M.T., Lopes, P. (2016). A aplicação ANOSOM\_SIG como ferramenta de gestão de risco em estruturas de proteção costeira e portuária. Em: *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa.
- Lemos, R., Silva, L., Fortes, J., Luís, L. (2014). Base de dados ANOSOM – Análise da observação sistemática de obras marítimas – O caso do porto de Nador. Em: Instituto Hidrográfico. *Actas das 3.º Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa, p. 335-338.
- Lemos, R.; Santos, J.A. (2007). *Análise de Observação Sistemática de Obras Marítimas - ANOSOM. Base de dados de Inspeções de Quebra-mares de Taludes*. Relatório de Projeto Proc. 0603/19/14932 NPE, LNEC.
- Pita, C. (1985). *Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude*. Boletim de Informação Técnica 37 – 2º Trimestre, 1985. Lisboa.
- Silva, L. S. D. (2014). *Avaliação do desempenho das políticas de defesa costeira: Obras de Defesa Costeira de 1995 a 2014. Contributo para o Sistema de Administração do Recurso Litoral (SIARL)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, L.G., Lemos, R. (2005). Observação sistemática de obras marítimas: Base de dados ANOSOM. Em: *4as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Angra do Heroísmo.
- Teixeira, R.A.F. (2012). *Quebramares portugueses. Inventário e análise comparativa de soluções*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

# Nova metodologia de validação dos dados das Estações Meteorológicas

M. Alves (1), S. Almeida (1), A. Jorge da Silva (1)

(1) Instituto Hidrográfico, 1249-093 Lisboa, Portugal. [margarida.alves@hidrografico.pt](mailto:margarida.alves@hidrografico.pt)

**Resumo:** Na década de 1980, o Instituto Hidrográfico, não dispondo de boias meteorológicas, decidiu instalar estações meteorológicas na zona costeira em locais não influenciados por obstáculos. Atualmente, esta rede é constituída por três estações localizadas nas proximidades de Viana do Castelo, Ferrel e Tavira. Com os dados adquiridos ao longo dos anos, foi possível elaborar séries longas de dados que permitem efetuar comparações com os dados fornecidos pela rede de boias multiparamétricas atualmente existente.

Logo após a instalação das estações meteorológicas costeiras, foram desenvolvidos procedimentos básicos para detetar e assinalar registos anómalos. As normas europeias tornaram necessária a atualização dos procedimentos de validação e controlo de qualidade automático dos dados, onde é possível assinalar dados anómalos, assim como picos ou saltos registados entre valores consecutivos. Neste trabalho descreve-se a nova metodologia adotada para os parâmetros meteorológicos, com base nas diretivas europeias e mundiais.

**Palavras-chave:** Estação Meteorológica, Rede de Monitorização, Controlo de Qualidade, Gestão de Dados

## 1. INTRODUÇÃO

A validação de dados é um processo considerado essencial para que os mesmos possam ser utilizados por qualquer indivíduo ou grupo de pessoas para além do seu originador. Procedimentos como os de calibração e verificação dos sensores fazem parte da validação dos dados. Só após este processo é que os dados são enviados para as bases de dados para armazenamento e posterior acesso. Nesta fase, o conceito de controlo de qualidade (*Quality Control - QC*) dos dados é vital, pois sem esse controlo, os dados de diferentes fontes não podem ser combinados ou reutilizados, desaparecendo as vantagens de integração, síntese e desenvolvimento de séries temporais longas (IOC/IODE, 1993).

Segundo Estévez *et.al.* (2011) existem três razões importantes para a aplicação do procedimento de QC aos dados meteorológicos: (i) assegurar que as informações meteorológicas são geradas adequadamente; (ii) identificar se os dados incorretos provêm de decisões desajustadas e (iii) detetar problemas de uma possível manutenção incorreta das estações e uma falta de calibração periódica dos sensores.

O QC permite, resumidamente, informar os utilizadores sobre a validade dos dados, os erros que foram encontrados e como estes foram corrigidos (IOC/IODE, 1993).

## 2. HISTÓRIA DAS ESTAÇÕES

Para apoio a estudos da dinâmica do oceano sobre a plataforma continental portuguesa, o Instituto Hidrográfico (IH) tem mantido um conjunto de estações meteorológicas ao longo da costa: Ferrel (Praia d'El Rei), instalada em 1984, Tavira (instalações do IPMA) em operação desde 1999 e Viana do Castelo (ETAR da Areosa), desde 2002 (Fig. 1). Para além das três estações acima mencionadas, o IH tem uma estação teste instalada na base hidrográfica da Azinheira.

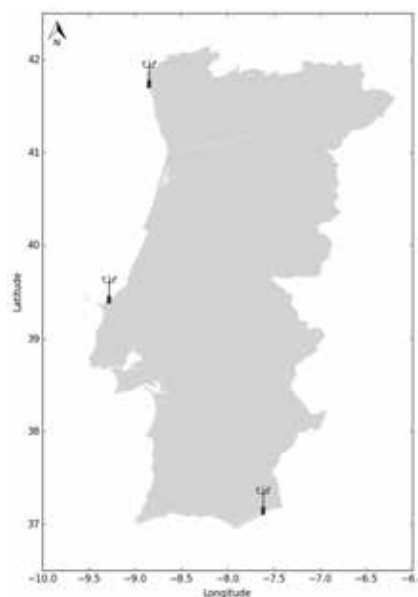


Fig. 1. Localização das estações meteorológicas.

### 2.1. Descrição das estações meteorológicas e dos sensores

Todas as estações são compostas por um mastro com diversos sensores, um registador (*Data loggers*) com 12 canais, uma unidade de armazenamento de dados (*Data Storage Unit*) e um painel solar (Fig. 2). Maioritariamente, todos os equipamentos utilizados nestas estações são fabricados pela *Aanderaa Instruments*. O intervalo de aquisição de dados é atualmente de 10 minutos.



Fig. 2. Estação meteorológica de Viana do Castelo.

Dos doze canais do registador, apenas nove estão ocupados, havendo ainda três posições livres para a instalação temporária de outros sensores. Do registador e dos sensores instalados obtêm-se a referência da estação, força e direção do vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, radiação solar, humidade relativa e pluviosidade. Assim, deve ser preservada a ordem acima referida para o posicionamento dos canais, de forma a facilitar o processo de validação automática dos dados.

Todos estes sensores enviam as suas leituras para o registador que automaticamente endereça via *ftp* (File Transfer Protocol) o conjunto de dados. No registador também é arquivado o grupo-data-hora (GDH).

## 3. VALIDAÇÃO

Foram adotadas metodologias europeias e internacionais de validação de dados em tempo real para serem aplicadas em todas as estações.

### 3.1. Indicadores do controlo de qualidade

O controlo de qualidade dos dados é efetuado em etapas sucessivas (Fig. 3), sendo atribuído um indicador em cada uma delas. Esse indicador, caracter numérico de 1 a 9, traduz a validação efetuada dos dados. Os códigos 0, 1, 4 e 9 são de aplicação obrigatória, segundo as recomendações do EuroGOOS *Data Management, Exchange and Quality Working Group* (2010) (Tabela I).

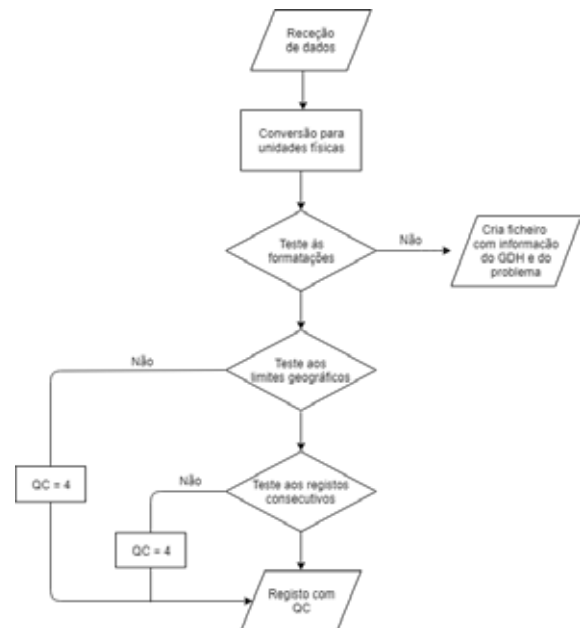


Fig. 3. Processo para a validação de dados meteorológicos.

Tabela I. Indicadores do controlo de qualidade.

Indicadores	Designação
0	Sem controlo de qualidade
1	Valor bom
2	Provavelmente valor bom
3	Provavelmente valor mau
4	Valor mau
5	Valor alterado
6	Valor abaixo do limite de deteção
7	Valor acima da cota
8	Valor interpolado
9	Valor em falta

Com os indicadores de qualidade, apresentados na tabela I, é permitido ao utilizador decidir sobre a realização, ou não, de uma triagem a aplicar aos dados, ou a eventual necessidade de aprofundar o conhecimento sobre quais as etapas onde foram ultrapassados os limites de validação.

### 3.2. Fluxo de dados

Após a receção dos dados provenientes de cada estação, o ficheiro é convertido para unidades físicas, com recurso a polinómios de calibrações de cada um dos sensores (Fig.3).

Todo este procedimento é realizado de forma automática e a metodologia de validação é efetuada em três fases:

- (1) Teste à formatação;
- (2) Teste aos limites geográficos;

## (3) Teste às diferenças entre valores consecutivos.

Se em alguma das fases, for atribuído o indicador 4, esse valor não volta a ser validado.

## 3.2.1. Teste à formatação

No teste à formatação pretende verificar-se a existência de falhas, se estes registos estão com todos os canais preenchidos e se a referência da estação (N) não sofreu alterações de  $N \pm 2$ . Estas variações na referência devem-se a alterações lentas que ocorrem ao longo dos anos no registor. De forma a ser mais fácil explicar este teste, irá ser apresentado um exemplo prático relativo à estação de Ferrel, figura 4.

```
2017-10-19 05:40:27 G 0591 0030 0040 0467 0522 0570 0511 0789 1023
2017-10-19 05:50:27 G 0591 0031 0040 0492 0523 0570 0511 0788 1023
2017-10-19 06:10:27 G 1023
2017-10-19 06:20:27 G 0591 0036 0040 0489 0523 0568 0511 0788 1023
2017-10-19 06:30:27 G 0591 0038 0040 0451 0523 0567 0511 0788 1023
2017-10-19 06:40:27 G 0591 0037 0048 0462 0523 0568 0511 0788 1023
```

Fig. 4. Exemplo da estação meteorológica de Ferrel.

Na figura, a primeira coluna corresponde ao grupo Data-Hora, a segunda à forma como esse grupo foi adquirido (no caso referido, com base na hora GPS) e as seguintes aos dados relativos à: referência da estação, velocidade média do vento ( $V_{med}$ ), velocidade máxima ( $V_{max}$ ), direção do vento (Dir), temperatura do ar (Temp), pressão atmosférica (Press), radiação solar total (Rad), humidade relativa (Hum) e pluviosidade (Pluv).

Para esta estação e para este período, a referência é 591, no entanto às 06:10 o valor da mesma foi de 1023, assim este registo será invalidado. Para além disso, verifica-se que não existe qualquer registo às 6:00, sendo atribuído o QC de valor em falta.

## 3.2.2. Teste aos limites geográficos

Na segunda fase do processo de validação pretende verificar-se se os valores se encontram dentro dos limites predeterminados para a região onde estão instaladas as três estações meteorológicas, com base nos valores apresentados nas metodologias propostas pela IOC (1993) e WMO (2004) (tabela II).

Tabela II: Janela de validação adotada para os dados meteorológicos.

	Limites Geográficos
$V_{med}$ (m/s)	0 a 50
$V_{max}$ (m/s)	0 a 75
Dir (°)	0 a 360
Temp (°C)	0 a 40
Press (hPa)	900 a 1050
Rad (W/m <sup>2</sup> )	-10 a 1600
Hum (%)	40 a 100
Pluv (mm)	0 a 40

Sempre que os valores de cada variável estiverem compreendidos entre os valores apresentados na tabela II, será atribuído o QC = 1, com a exceção da variável  $V_{max}$ . Ou seja, se a  $V_{max}$  não estiver compreendida entre 0 e 75 o QC será igual a 4, mas se não obedecer à fórmula

$$V_{med} < V_{max} < V_{med} + 5$$

o QC atribuído é de 2.

Ao analisar a figura 5 é possível verificar que se registaram valores fora dos limites geográficos apresentados na tabela II. Assim, para esses registos foi atribuído o indicador de qualidade QC de valor mau.

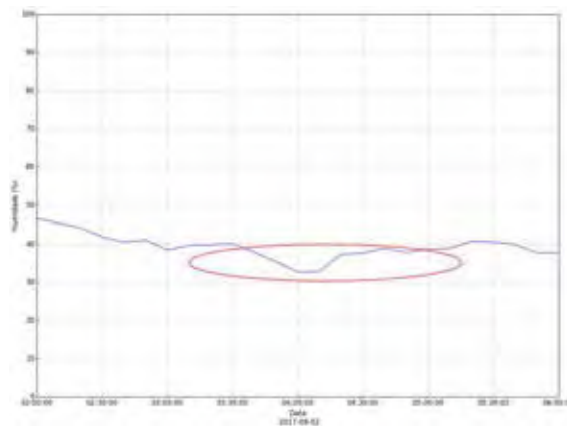


Fig. 5. Exemplo de valor mau para a variável humidade relativa.

## 3.2.2. Teste às diferenças entre registos consecutivos

Nesta última fase da validação são verificadas as diferenças entre registos consecutivos para todas as variáveis, exceto para a  $V_{max}$  e para a Dir. Na figura 6 é apresentado um caso real da aplicação deste teste na estação de Ferrel para a temperatura. Nesta variável, sempre que se verifique uma diferença entre registos consecutivos superior a 3°C, é atribuído o QC de provavelmente valor bom.

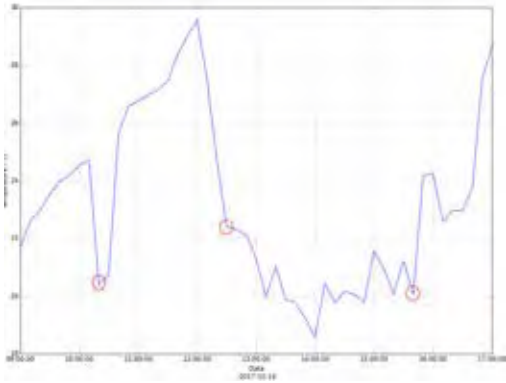


Fig. 6. Exemplo de valor duvidoso para a variável temperatura.

#### 4. CONCLUSÕES

A metodologia de validação automática implementada nos dados destas estações meteorológicas mostrou ser uma vantagem na análise da operacionalidade dos sensores instalados nestes polos. Além disso, a inclusão do QC introduz aos utilizadores finais destes dados informações fiáveis.

A metodologia apresentada neste artigo aplica-se aos dados em tempo real. No entanto, estes dados terão de ser submetidos a um pós-processamento de forma a ser efetuada uma validação mais detalhada.

#### REFERÊNCIAS

- EuroGOOS DATA-MEQ Working Group (2010). Recommendations for in-situ data Near Real Time Quality Control. EG10.19.
- IOC/IODE (1993). Manual of quality control procedures for validation of oceanographic data. IOC Manuals and Guides n°26.
- World Meteorological Organization (2004). Guidelines on Quality Control Procedures for data from Automatic Weather Station. Doc.6.1(2).



## Implementação da Diretiva INSPIRE no tema Toponímia

A. Serronha (1), F. Caldeira (2), A. Morgado (3)

- (1) Direção-Geral do Território ([aserronha@dgterritorio.pt](mailto:aserronha@dgterritorio.pt))
- (2) Instituto Nacional de Estatística
- (3) Instituto Hidrográfico

**Resumo:** O tema Toponímia (*Geographical Names*) enquadra-se na informação geográfica de referência do Anexo I da diretiva INSPIRE em que constam denominações de zonas, regiões, localidades, cidades, subúrbios, povoações, ou qualquer entidade geográfica ou topográfica de interesse público ou histórico. Este tema está associado a outros temas do Anexo I desta diretiva, tais como: Unidades Administrativas, Endereços, Hidrografia, Redes de Transporte, Sítios Protegidos, etc. Este artigo pretende descrever o processo inerente à harmonização e publicação de Conjuntos e Serviços de Dados Geográficos do tema Toponímia, através de serviços de visualização *Web Map Service* (WMS) e de serviços de descarregamento *Web Feature Service* (WFS), de acordo com as disposições de execução definidas pela Diretiva INSPIRE e de forma articulada entre o Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE), a Direção-Geral do Território (DGT), o Instituto Hidrográfico (IH) e o Instituto Nacional de Estatística (INE), utilizando *software* de código aberto.

**Palavras-chave:** Toponímia, *Geographical Names*, INSPIRE, harmonização, *software* de código aberto.

### 1. INTRODUÇÃO

Os dados geográficos são produzidos por diferentes organizações, com diferentes formas de representar a informação geográfica e com diferentes formatos e Sistemas de Referência Espacial (SRS) associados, tornando a integração de dados uma tarefa complexa.

As Infraestruturas de Informação Geográfica (IIG) normalizadas contribuem para ultrapassar algumas complexidades do parágrafo anterior, fornecendo “Dados/Serviços” que são úteis a uma comunidade de utilizadores que é cada vez mais dependente de dados geográficos.

Uma IIG é um conjunto de tecnologias, políticas e acordos institucionais que facilitam a disponibilização e acesso a informação de natureza espacial, viabilizando a pesquisa, avaliação e exploração de informação geográfica por diversos utilizadores (administração pública, academia, centros I&D, empresas, organizações não governamentais (ONG) e cidadãos).

### 2. A DIRETIVA INSPIRE E A HARMONIZAÇÃO DE CONJUNTOS E SERVIÇOS DE DADOS GEOGRÁFICOS

No âmbito da Diretiva INSPIRE a harmonização de dados é o processo de desenvolvimento de um conjunto comum de especificações de dados que

viabilizam o acesso a Conjuntos de Dados Geográficos (CDG), através de Serviços de Dados Geográficos (SDG), permitindo, dessa forma, combinar os dados de forma coerente e interoperável.

As diferentes fases do processo de harmonização de CDG envolvem a análise dos modelos de dados (origem e destino), o mapeamento (*matching table* ou quadro de correspondências) entre os modelos, a transformação, a validação e a publicação dos CDG através de SDG. Nos serviços de descarregamento um dos formatos de dados a considerar deverá ser o GML 3.2.1.

### 3. A TOPONÍMIA E A DIRETIVA INSPIRE

#### 3.1 Objetivos

Na Diretiva INSPIRE o tema toponímia desempenha diversas funções e tem múltiplas finalidades:

- 1) Critério de pesquisa de informação em *WebServices*, GeoPortais, etc;
- 2) *Geocoding*;
- 3) Visualização de informação geográfica em “mapas ou ecrã”;
- 4) Identificadores geográficos;
- 5) Processamento de informação espacial composta por dados históricos;

- 6) Correta utilização de nomes geográficos para comunicação, estado (oficial, histórico) propriedades linguísticas (língua, soletração), etc;

Neste sentido, pretendeu-se ensaiar a harmonização do tema da Toponímia (Nomes Geográficos) contemplando topónimos de 4 entidades (CIGeoE, DGT, IH e INE), numa perspetiva de integração de dados, que sendo representativos de diferentes objetos ou não estando associados a nenhum objeto específico, são recolhidos com diferentes exatidões e características. Foram ainda considerados outros topónimos que resultam de processos de generalização e como tal, são representáveis a escalas diferenciadas. Esta atividade enquadrou-se nos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de trabalho transversal INSPIRE-PT (GTI-TR) em articulação com o grupo de trabalho temático INSPIRE-PT (GTI-TE-9).

### 3.2 Desafios

Como existem diferentes entidades (Fig. 1) a produzir informação de toponímia em Portugal continental o desafio passaria por construir um repositório único para alguns organismos da Administração Pública Central centralizarem e disponibilizarem / reportarem CDG através de SDG à Comissão Europeia.



Fig. 1. Entidades da Administração Pública envolvidas no processo de harmonização de CDG.

A diferenciação dos dados ao nível da escala de produção levou a que se associassem distintas escalas de visibilidade, no serviço de visualização, para todos os topónimos (Fig. 2).

snig		
Estratégia nacional para a harmonização dos CDG do Anexo I em 2017		
TEMA	ENTIDADE	CDG
Toponímia	CIGeoE, 2011, IHT, AFA	- Toponímia (GTI-TR) - Nomes de relevos submarinos

Instituição	Reportado
CIGeoE	Toponímia da Série 500K
DGT	Toponímia de Portugal Continental na escala 1:200 000
IH	Nomes dos relevos submarinos (escala 1:1 000 000)
INE	Lugares 2011
...	...

Level of Detail	Map Scale	Entidade
8	1 : 2,311,166.84	IH
9	1 : 1,155,583.42	CIGEOE, IH
10	1 : 577,791.71	CIGEOE, IH
11	1 : 288,895.85	DGT
12	1 : 144,447.93	DGT
13	1 : 72,223.96	INE
14	1 : 36,111.98	INE
15	1 : 18,055.99	INE
16	1 : 9,028.00	INE
17	1 : 4,514.00	INE
18	1 : 2,257.00	INE
19	1 : 1,128.50	INE

Fig. 2. Estratégia nacional para a harmonização dos dados (com o respetivo nível de detalhe) de cada entidade.

## 4. ESTRATÉGIA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA DIRETIVA INSPIRE NO TEMA TOPONÍMIA

Partindo do pressuposto que é possível implementar a Diretiva INSPIRE com *software Open Source* procedeu-se à criação de um repositório de Base de Dados (BD) únicos em *PostgreSQL/PostGIS* e com um modelo de dados pré-definido orientado para responder a esta diretiva (Fig. 3).



Fig. 3. Fluxo da implementação da diretiva INSPIRE em software de código aberto.

Esse modelo de dados que se designou por “intermédio” inclui:

- todos os campos obrigatórios que servem de requisito ao modelo de dados INSPIRE de destino (*target schema xsd Geographical Names 4.0*);
- alguns campos opcionais (Fig. 4) para os quais se considerou que seria possível preencher (já que haviam dados para esse efeito) com a respetiva informação geográfica e alfanumérica associada.



Fig. 4. Lista de valores (de preenchimento não obrigatório na diretiva INSPIRE) em que foi tomada a decisão das entidades tipificarem cada topónimo.

## 5. TRANSFORMAÇÃO DOS CDG DO MODELO ORIGEM PARA O MODELO DESTINO PASSANDO POR UM “MODELO INTERMÉDIO”

Coube a cada instituição definir metodologias expeditas e adequadas para transferir dados (Fig. 5) para o que se denominou de “modelo de dados intermédio”, estruturando e organizando automatizações nos processos de cada modelo de origem, para que estes dados fossem facilmente integrados e atualizáveis.

- ✓ **Software:** HALE STUDIO 3.3.2;
- ✓ **Esquema origem:** Toponímia (escala 1:200 000) da DGT; Nomes dos relevos submarinos (escala 1:1 000 000) do IH e Toponímia (da Série 1:500 000) do CIGeoE;
- ✓ **Esquema destino:** WFS-T (BD no INE) onde foram previamente incluídos os topónimos dos Lugares (INE 2011).



Fig. 5. Exemplo de mapeamento do esquema origem, com dados da DGT, para o esquema destino (via WFS-T) da BD centralizada no INE.

A harmonização destes dados segundo a Diretiva INSPIRE é efetuada a jusante desta fase e foi concebida para que não houvesse mais nenhuma intervenção humana no modelo final de destino.

## 6. ACESSO AO SERVIÇO E DEPÓSITO DOS DADOS NUM “MODELO INTERMÉDIO”

A transferência dos dados de cada instituição para a BD centralizada no INE é efetuada remotamente via WFS-T (com *login* e *password*) e, para isso, foram elaborados vários WFS por entidade, com sistema de autenticação com *service level Transactional*, permitindo desta forma responder a pedidos para criar, apagar e atualizar informação geográfica, em qualquer *software SIG desktop* (QGIS, ArcGIS, etc.)

A camada geográfica contemplada foi apenas de pontos (*GM\_Point*) no sistema de referência de coordenadas com o código EPSG 3763 - ETRS89 / Portugal TM06.

Por exemplo, o carregamento dos dados foi feito de forma semi-automática, através de cópia dos dados em formato GML (*WFS 2.0 Feature Collection*) ou em *shapefile* para o esquema do WFS-T:

- ✓ com o filtro origem = ‘sigla da entidade’ não se visualiza nem se acede à restante informação da BD.

## 7. HARMONIZAÇÃO

O modelo definido para o carregamento/edição de dados, ainda não está (nesta fase do processo) de acordo com a Diretiva INSPIRE. Apenas tem os campos que se pretende que tenham preenchimento obrigatório e outros campos de preenchimento opcional.

No processo de harmonização com recurso ao *software HALE STUDIO* foram evitadas as funções (Fig. 6) não suportadas pelo *GeoServer* para estabelecer as relações entre o esquema de dados origem e destino (Fig.7).



Fig. 6. Exemplo de algumas funções do *software HALE STUDIO* suportadas e não suportadas pelo *GeoServer*

- ✓ **Esquema origem:** BD no INE (já com dados do INE, da DGT e do IH). O CIGeoE até à presente data ainda não procedeu à transferência dos seus dados.
- ✓ **Esquema destino:** INSPIRE Geographical Names 4.0

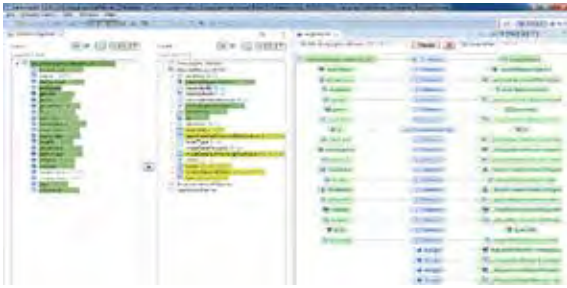


Fig. 7. Exemplo do mapeamento do esquema origem (BD centralizada no INE) para o esquema INSPIRE de destino.

Foi assegurada a integração do software *HALE STUDIO* com o software *GeoServer* recorrendo à extensão *AppSchema* e à extensão *INSPIRE* (Fig.8).

Vantagens de utilização da extensão *AppSchema*:

- ✓ Implementação de *Complex Features* em serviços de mapas WMS e WFS;
- ✓ Qualquer alteração nos dados é refletida imediatamente nos serviços com a informação harmonizada;
- ✓ Solução *Open Source*;
- ✓ A utilização do software *HALE STUDIO* como interface gráfica evita uma criação complexa do ficheiro XML de mapeamento.



Fig. 8. Integração entre o software *HALE STUDIO* e o software *GeoServer* para disponibilizar serviços *INSPIRE* de mapas.

## 8. VALIDADOR INSPIRE

O validador *INSPIRE* <http://inspire-sandbox.jrc.ec.europa.eu/etf-webapp/> ainda não é uma plataforma completamente concluída e estável mas já permitiu identificar e consequentemente proceder à resolução de alguns erros que foram detetados.

## 9. DISPONIBILIZAÇÃO DO CDG ATRAVÉS DE SERVIÇOS

Nesta fase os *CSDG* já se encontram harmonizados e acessíveis através do serviço de visualização *WMS* e de descarregamento *WFS*

É possível aceder ao serviço *WMS* através do seguinte endereço:

<http://inspire.ine.pt/geoserver/gn/wms>

Para algumas versões mais antigas do software *QGIS* só é possível descarregar estes dados da Toponímia através do *plugin WFS 2.0 Client* (Fig.9) recorrendo ao endereço:

<http://inspire.ine.pt/geoserver/gn/wfs>

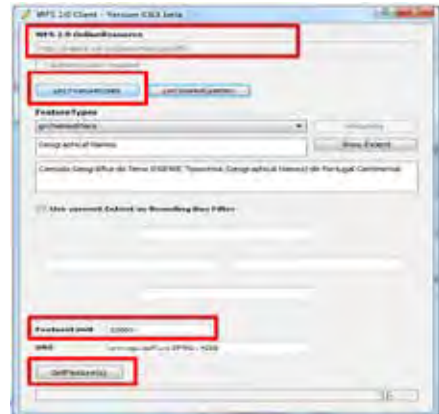


Fig. 9. Plugin *WFS 2.0 Client* do software *QGIS*.

## 10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Coube ao *INE* a publicação de todos os metadados referentes aos *CSDG* e assumiu-se uma governança partilhada destes dados entre todas as entidades envolvidas. É também possível aceder, para cada um dos topónimos, ao organismo detentor e responsável por essa informação.

Estão disponíveis para diferentes níveis de visualização 32676 topónimos (*DGT* = 7054; *IH* = 149 e *INE* = 25473).

Ainda faltam fazer mais testes de carregamentos via *WFS-T* (para um grande volume de dados pode ser necessário alterar configurações no *timeout* do *Jetty*) e quanto à configuração dos serviços *WMS INSPIRE* ainda há alguns aspetos a ter em conta:

- ✓ Simbologia (*representação* pelas normas *Open Geospatial Consortium* (*OGC*) do *Styled Layer Descriptor* (*SLD*);
- ✓ *Layer - Title, abstract, Keywords, Metadata links, Style, Authority*;
- ✓ *Etc.*

Outros dados podem, no futuro, vir a ser integrados no modelo que se designou de “modelo de dados intermédio”.

## Hidrográfico+ : O processo de evolução da infraestrutura de dados espaciais marinhos do Instituto Hidrográfico

P. Nunes (1), A. Correia (1), I. Cruz (1) e S. Godinho (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 Lisboa. [antunes.nunes@hidrografico.pt](mailto:antunes.nunes@hidrografico.pt).

**Resumo:** A nível internacional é reconhecido o papel e a importância das infraestruturas de dados espaciais (IDE) como motores de desenvolvimento económico, por potenciarem a partilha e reutilização do recurso informação numa perspetiva de economia circular. A nível europeu, a Diretiva INSPIRE está em fase de implementação e operacionalização, apresentando as orientações técnicas, operacionais e estratégicas para edificar uma IDE regional vocacionada ao apoio das políticas ambientais e da governação.

O Instituto Hidrográfico tem um papel estratégico como referência nas infraestruturas de dados geoespaciais marinhos mantendo há vários anos a Infraestrutura de Dados do Ambiente Marinho.

O presente artigo pretende descrever o processo de concetualização do “Hidrográfico +”, um projeto financiado pelo SAMA2020, com implementação até 2020. Visa a modernização da IDE do IH para potenciar a partilha de informação sobre o meio marinho de acordo com as melhores práticas e alinhando-se com as obrigações legais.

**Palavras-chave:** Infraestruturas de dados espaciais, IDAMAR, INSPIRE, SAMA2020, Geoportal.

### 1. INTRODUÇÃO

As infraestruturas de informação geográfica têm vindo a assumir um papel preponderante com a evolução tecnológica operada na Internet. A crescente partilha de informação geoespacial contribui de forma direta e indireta para o crescimento económico dos países. De acordo com as conclusões do relatório de impacto que analisou a realidade de 22 países, os serviços geoespaciais geraram em 2016 um impacto económico estimado de 400.000 milhões de dólares (AlphaBeta, 2016).

Por outro lado, os desenvolvimentos tecnológicos operados na rede da Internet permitem elevadas taxas de transferência de dados abrindo portas a novas utilizações privadas e comerciais dos dados geográficos, e a um movimento de aproveitamento e exploração da cadeia de valor associada aos dados e informação. Paralelamente à crescente capacidade de transferência de informação, existe um esforço para dotar a internet com informação de contexto que origine uma rede com formas mais inteligentes de explorar essa mesma informação, e.g. o *Joint Research Centre (JRC) (2017)* lançou recentemente projetos na área de *Semantic Web* para explorar a transformação de dados da infraestrutura europeia - INSPIRE em formato *Ressource Description Framework (RDF) (W3C, 2014)*.

Estas forças de evolução geram sempre novas oportunidades. Por um lado, novas formas de gerar conhecimento e valor, e desafios na outra face da moeda, e.g. interoperabilidade da informação e o processamento e armazenamento de volumes cada vez maiores de informação. Com estes desafios aparecem novas abordagens aos problemas

concetualizadas nos conceitos de: *Semantic Web*, *Big Data* e *Machine Learning*.

Estas tendências de partilha de informação e de exploração do recurso informacional para o bem comum, geram também preocupações de governança nas organizações internacionais, regionais e nacionais, e.g. UN-GGIM (UN Statistics Division, s.d.), *Marine Spatial Data Infrastructures Working Group (MSDIWG OHI) (OHI, s.d.)*, INSPIRE (European Commission, s.d.-b) e SNIG (DGT, s.d.), que proativamente procuram encontrar modelos que respondam à evolução perspetivada.

A primeira questão que poderemos colocar é: o que é uma Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE)? Como nas restantes áreas do conhecimento torna-se difícil encontrar uma definição única e globalmente aceite para o conceito de IDE. Neste artigo vamos seguir a definição adotada no *The SDI Cookbook (GSDI, 2004)* – “denote the relevant base collection of technologies, policies and institutional arrangements that facilitate the availability of and access to spatial data.”

O Instituto Hidrográfico (IH) reconhecendo a evolução do conceito de IDE e a necessidade de atuar ações para acompanhar o contexto externo, está a desenvolver um projeto de modernização da sua IDE - Infraestrutura de Dados do Ambiente Marinho (IDAMAR) designado Hidrográfico + no âmbito do SAMA 2020.

O artigo pretende apresentar a concetualização do projeto, que se encontra organizado em quatro secções, a primeira vai apresentar os antecedentes e o problema, a segunda a metodologia concetual que será adotada, a terceira apresenta os resultados

esperados e o nível de ambição organizacional, e a última as conclusões.

## 2. ANTECEDENTES E O PROBLEMA

O IH há vários anos definiu internamente a necessidade estratégica de possuir uma IDE de nível organizacional - a Infraestrutura de Dados do Ambiente Marinho (IDAMAR). Esta IDE resultou da necessidade de oferecer aos colaboradores internos, das várias áreas de investigação das Ciências do Mar, uma mesma infraestrutura de trabalho e também de responder às necessidades informacionais associadas às competências e atribuições do IH enquanto organismos da Marinha e à sua natureza de Laboratório de Estado.

A estrutura do IDAMAR encontra-se representada na Fig. 1, e previa a integração de todos os elementos de base de uma IDE. O IH, através do Centro de Dados Técnico-Científicos, foi desenvolvendo esforços para edificar todos os componentes (Fig. 2), todavia a total integração obrigava a um esforço de investimento que não se coadunava com os recursos disponíveis.



Fig. 1. Infraestrutura de Dados do Ambiente Marinho (IDAMAR).

Em paralelo aos desenvolvimentos da IDAMAR, o IH assistiu à mudança operada no contexto externo com o crescente reconhecimento do valor da informação geoespacial e o aumento da importância das IDE como vetores fundamentais à governança do meio ambiente e ao crescimento económico através da dinamização do tecido tecnológico nacional. Estas forças evolutivas associadas ao desenvolvimento da economia e à necessidade da tomada de melhores decisões de gestão do meio ambiente, conduziram a políticas europeias para implementação de uma mesma visão regional, e.g. *Public Sector Information* (PSI) (European Commission, 2013, W3C, 2016), *Digital Single Market* (DSM) (European Commission, 2015), *INSPIRE* (European Commission, s.d.-b), as diretivas setoriais nos vários domínios do ambiente, *European eGovernment* (European Commission, 2017, European Commission, s.d.-a), etc. As obrigações legais trouxeram a necessidade de implementar alterações organizacionais que possam garantir um alinhamento estratégico desde o nível organizacional ao nível regional.

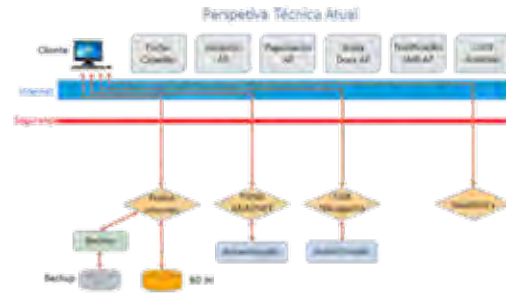


Fig. 2. Perspetiva técnica da situação atual.

Através de uma análise e reflexão interna com os seus colaboradores, foi assumido pelo IH que a IDAMAR está atualmente desalinhada com as novas obrigações estratégicas e tecnológicas. Constatou-se que existia uma necessidade premente de evoluir a IDE do IH e que esse processo obrigaria à alocação de recursos humanos e financeiros, que não estão disponíveis na organização. O projeto Hidrográfico +, integrado no sistema de apoio à transformação digital da administração pública (SAMA2020), aparece como o elemento que irá permitir colmatar as limitações identificadas: desalinhamento estratégico e tecnológico, contribuindo para o cumprimento dos seguintes objetivos:

- Cumprir a legislação nacional e internacional aplicável ao IH em matéria de tecnologias da informação e de disponibilização de informação;
- Aproximar do IH um universo mais alargado de *stakeholders*;
- Modernizar a infraestrutura tecnológica do IH, passando a ter interligação aos serviços partilhados da Administração Pública atualmente disponibilizados (iAP);
- Desburocratizar o processo associado ao serviço de cedência de dados;
- Aumentar o universo de informação disponibilizada;
- Introduzir novas soluções tecnológicas;
- Promover boas práticas.

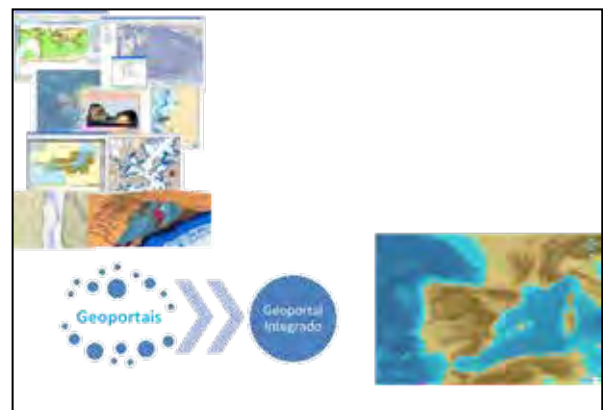


Fig. 3. Hidrográfico + como porta única de entrada para a IDAMAR modernizada.

Além do desalinhamento tecnológico (formatos de partilha de informação e tecnologias de suporte) e estratégico (obrigações legais nacionais e europeias) da IDAMAR, existe um serviço personalizado de cedência de dados que não responde às exigências atuais - <http://www.hidrografico.pt/cedencia-de-dados.php>. Este serviço de cidadania, sendo essencialmente conduzido de forma manual, requer a alocação de recursos humanos para preparar os dados de acordo com os requisitos do utilizador. Com uma infraestrutura de serviços o IH espera implementar uma automatização supervisionada (o processo será automatizado após aprovação da licença associada ao perfil do requerente) que venha desburocratizar o processo associado ao serviço de Cedência de Dados.

O objetivo geral do projeto Hidrográfico + é garantir a modernização da IDE do IH alinhando-a com as melhores práticas internacionais e com os requisitos legais vertidos nas diretivas nacionais e da União Europeia (em especial a Diretiva INSPIRE).

A parte visível ao utilizador será um único portal moderno e interativo com informação georreferenciada nas áreas da oceanografia, hidrografia, navegação, cartografia, geologia marinha e química marinha (Fig. 3).

### 3. METODOLOGIA

O projeto Hidrográfico + vai decorrer durante 24 meses, desde 07 de maio de 2018 a 07 de maio de 2020, e seguirá um modelo de tarefas genérico com uma fase inicial de seis meses. Na primeira fase é esperado que os colaboradores realizem um levantamento do ponto de situação da IDAMAR: identificação de obrigações legais; identificação de boas práticas e recolha do conhecimento tácito dos colaboradores (Fig. 4). A fase inicial irá fundamentar o caderno de encargos e a contratação de serviços de desenvolvimento dos componentes necessários à integração, ao alinhamento estratégico e tecnológico da IDAMAR.

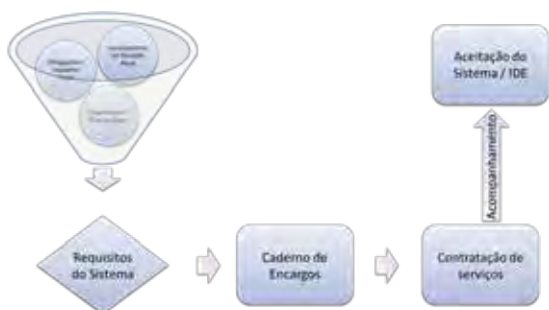


Fig. 4. Modelo genérico de desenvolvimento do projeto.

A fase de desenvolvimento aplicacional será realizada com o acompanhamento dos utilizadores, estando planeado a implementação de um processo

contínuo de garantia e controlo de qualidade do projeto.

### 4. RESULTADOS ESPERADOS

Com uma IDAMAR modernizada através do projeto Hidrográfico + é esperado que seja possível integrar as diferentes componentes da IDE numa arquitetura orientada a serviços com *Web Services* e aplicações que controlam o acesso automatizado aos dados (dados, informação e metadados) geoespaciais do meio marinho harmonizados de acordo com boas práticas e obrigações legais, e com a política de dados do IH.

Espera-se que esta mudança organizacional venha a permitir responder de forma mais eficiente aos parceiros e clientes do IH. Este esforço corresponderá a um melhor serviço para o cidadão em geral. O processo de automatização supervisionada garantirá a base para o desenvolvimento económico de terceiros.



Fig. 5. Perspetiva Cliente-Servidor do Hidrográfico +.

A IDE modernizada corresponderá a uma total integração de todos os componentes da IDAMAR, irá ter na sua arquitetura os serviços geográficos recomendados pela diretiva INSPIRE e estará integrada com os serviços externos transversais da Administração Pública contribuindo desta forma para o PSI, eGovernment e DSM (Fig. 6).

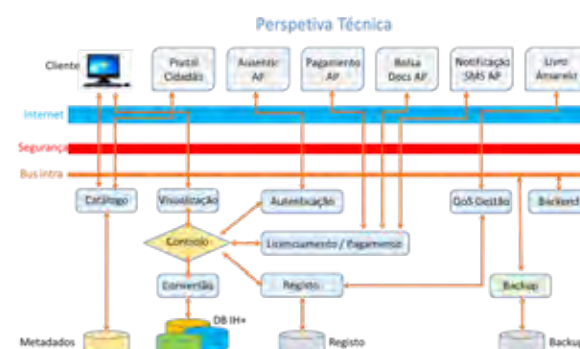


Fig. 6. Perspetiva técnica da IDE do Hidrográfico +.

## 5. CONCLUSÃO

As infraestruturas de informação geográfica assumiram um papel preponderante com as evoluções tecnológicas operadas na Internet.

A partilha de informação geográfica permite desenvolver novos modelos de negócio que correspondem a uma cadeia de valor e que, em termos económicos, foi estimada em 400,000 milhões de dólares.

A transformação digital gera novas forças evolutivas que obrigam todas as organizações a se adaptarem.

O IH, enquanto Laboratório de Estado de referência na área das ciências do mar, sentiu a necessidade de desenvolver esforços para atualização da sua IDE – IDAMAR alinhando-a estrategicamente e tecnologicamente com a visão e estratégia nacional, potenciando o desenvolvimento económico e científico, associado aos dados que armazena e produz diariamente sobre o meio marinho.

O projeto Hidrográfico + é uma iniciativa de investimento na modernização da IDAMAR, realizada com o apoio dos fundos comunitários, que permitirá integrar os requisitos atuais dos clientes e utilizadores da informação do Mar Português.

### Agradecimentos

O projeto “Hidrográfico +” com o número de operação 035422 foi aprovado pelo COMPETE 2020 sendo apoiado pelo FEDER, nos termos do aviso n.º 01/SAMA/2017.



## REFERÊNCIAS

AlphaBeta. 2016. *The economic impact of Geospatial Services: How consumers, business and society benefit from location-based information* [Em linha]. Disponível em: [https://storage.googleapis.com/valueoftheweb/pdfs/GeoSpatial%2520FA\\_Pages-compressed%2520%25282%2529.pdf](https://storage.googleapis.com/valueoftheweb/pdfs/GeoSpatial%2520FA_Pages-compressed%2520%25282%2529.pdf) [Consult. maio 2018].

DGT. s.d. *Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG)* [Em linha]. Disponível em: <http://snig.dgterritorio.pt/portal/> [Consult. maio 2018].

European Commission. 2013. *European legislation on the re-use of public sector information* [Em linha]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/european-legislation-reuse-public-sector-information> [Consult. maio 2018].

European Commission. 2015. *Shaping the Digital Single Market* [Em linha]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/shaping-digital-single-market> [Consult. maio 2018].

European Commission. 2017. *New study on eGovernment services | Europe is improving in cross-border availability of services* [Em linha]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/new-study-egovernment-services-europe-improving-cross-border-availability-services> [Consult. maio 2018].

European Commission. s.d.-a. *eGovernment* [Em linha]. Disponível em: [https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/egovernment\\_en](https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/egovernment_en) [Consult. maio 2018].

European Commission. s.d.-b. *Infrastructure for spatial information in europe (INSPIRE)* [Em linha]. Disponível em: <http://inspire.ec.europa.eu/> [Consult. maio 2018].

GSDI 2004. *The SDI Cookbook*. Em D. D. Nebert ed., GSDI.

JRC. 2017. *Using INSPIRE geospatial data to create innovative added-value services* [Em linha]. Disponível em: <https://inspire.ec.europa.eu/news/using-inspire-geospatial-data-create-innovative-added-value-services> [Consult. maio 2018].

OHI. s.d. *Marine Spatial Data Infrastructure Working Group (MSDIWG)* [Em linha]. Disponível em: [https://www.iho.int/srv1/index.php?option=com\\_content&view=article&id=483&Itemid=370&lang=en](https://www.iho.int/srv1/index.php?option=com_content&view=article&id=483&Itemid=370&lang=en) [Consult. maio 2018].

UN Statistics Division. s.d. *UN-GGIM* [Em linha]. Disponível em: <http://ggim.un.org/> [Consult. maio 2018].

W3C. 2014. *Ressource Description Framework (RDF)* [Em linha]. Disponível em: <https://www.w3.org/RDF/> [Consult. maio 2018].

W3C. 2016. *Best Practice: Standards for Geospatial Data* [Em linha]. Disponível em: <https://www.w3.org/2013/share-psi/bp/sgd/> [Consult. maio 2018].



## As tendências das infraestruturas europeias de dados marinhos

P. Nunes (1), A. Saramago (1), C. Borges (1), L. Veiga (1) e S. Almeida (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 Lisboa. [antunes.nunes@hidrografico.pt](mailto:antunes.nunes@hidrografico.pt).

**Resumo:** As infraestruturas de dados marinhos *Seadatanet* e *EMODnet* têm sido edificadas ao longo de vários anos sobre a égide da Comissão Europeia por consórcios de organizações e centros de dados marinhos europeus. O principal objetivo destas iniciativas é tornar acessíveis ao cidadão e às organizações (públicas e privadas) os dados marinhos que se encontram dispersos por múltiplas organizações em formatos diversos. Através da partilha de dados e informação pretende-se potenciar o valor agregado da informação seguindo o princípio de – “observar uma vez, utilizar várias vezes”. Através da disponibilização de uma infraestrutura tecnológica de dados marinhos harmonizados e interoperáveis, pretende-se incrementar o potencial económico e ecológico do recurso informação. O presente artigo apresenta as principais tendências das infraestruturas europeias de dados marinhos (*Seadatanet* e *EMODnet*) na procura de uma maior partilha de informação marinha e na implementação dos princípios de dados abertos.

**Palavras-chave:** Infraestruturas de dados espaciais marinhos, Sistemas de informação geográfica, EMODnet, *Seadatacloud*, Partilha de informação.

### 1. INTRODUÇÃO

As infraestruturas Europeias de informação marinha são iniciativas suportadas pela Comissão Europeia no âmbito da Economia Azul.

Em 2007, a Comissão Europeia estabeleceu o objetivo de criar uma infraestrutura sustentável e interoperável de dados marinhos que substituísse os múltiplos repositórios de dados, desarticulados, não homogêneos e inacessíveis (Comissão Europeia, 2014).

A rede *European Marine Observation and Data Network* (EMODnet) tem o objetivo explícito de melhorar o acesso aos dados marinhos e, dessa forma, reduzir os custos para os utilizadores, potenciando a inovação e o conhecimento disponível sobre os mares e oceanos (Comissão Europeia, 2012).

O projeto EMODnet apareceu cerca do ano 2008 através do estabelecimento de parcerias entre várias organizações no âmbito da iniciativa *marine knowledge* alinhada com *Blue Book on the Integrated Maritime Policy (IMP)* da Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2012, Europeia, 2016). Atualmente é considerado um projeto líder que visa a geração de um mapa digital dos espaços marinhos europeus, até 2020 (Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, 2018). Os parceiros da rede EMODnet desenvolveram de uma forma colaborativa uma plataforma tecnológica constituída por vários portais temáticos interoperáveis, acessíveis de uma forma comum pela comunidade de utilizadores (EMODnet Consortium, s.d.).

O princípio da rede EMODnet é a manutenção dos repositórios de dados nas organizações criando-se as

condições para que o acesso aos dados seja garantido de uma forma harmonizada, num princípio de acesso sem custos e livre de restrições (Comissão Europeia, 2014).

Como é possível observar na Fig. 1 a rede EMODnet apresenta um conjunto de objetivos concorrentes para a Estratégia Europeia de Crescimento Azul.

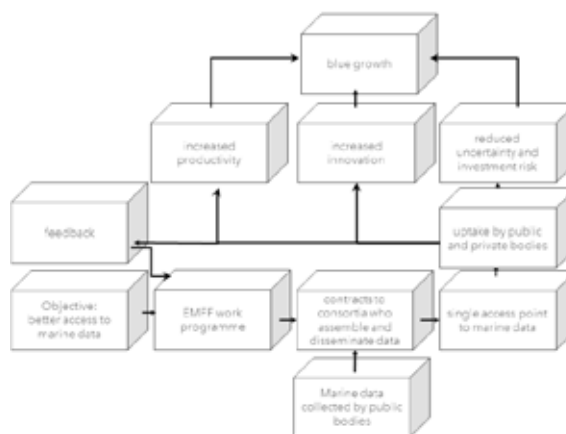


Fig. 1. Esquema conceitual da articulação dos objetivos da rede EMODnet e o seu contributo para o crescimento azul. Extraído do relatório de avaliação de rede EMODnet (Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, 2018).

O projeto *SeaDataCloud* (SDC) é a última geração de uma linha de desenvolvimento que começou nos anos 90 e culminou na infraestrutura pan-europeia de dados marinhos, com os esforços e a colaboração de Centros de Dados de 35 países.

Os primórdios da infraestrutura foram os arquivos de metadados MEDAR/MedAtlas que depois evoluíram para o projeto *Sea-Search* (2002-2005), a *SeaDataNet* (2006-2011), *SeaDataNet II* (2011-2015) e a *SeaDataCloud* (2016-2020) (Schaap e Fichaut, 2017b).

SDN é uma infraestrutura que apresenta uma arquitetura distribuída para gerir as diversas tipologias de dados marinhos (observações *in situ*). Sendo constituída maioritariamente por centros de dados marinhos de referência, apresenta dados de elevada qualidade integrados em bases de dados.

O projeto apresenta um portal único de acesso e disponibiliza as ferramentas necessárias para garantir a interoperabilidade e harmonização dos dados, com serviços de pesquisa e acesso *on-line* a dados, metadados e dicionários comuns de vocabulário (SeaDataNet Consortium, s.d.).

A infraestrutura SDN tem procurado seguir as boas práticas na partilha de dados e informação, contribuindo de forma ativa para o desenvolvimento de *standards* em estreita colaboração com as organizações de normalização, e.g. ISO (19115, 19139), e OGC (WMS, WFS, CS-W e SWE). O projeto tem garantido o desenvolvimento, a manutenção e redistribuição de ferramentas de transformação de dados e criação de metadados. Dessa forma, torna possível garantir a acessibilidade aos dados marinhos Europeus de uma forma coerente e interoperável com um impacto significativo num universo alargado de utilizadores com diferentes níveis de *expertise* na área. A SDN está a estender a capacidade de computação através de parcerias com os centros europeus de computação de alto desempenho do consórcio EUDAT. O projeto SDC tem trabalhado no desenvolvimento e adoção de metodologias que fazem uso da *cloud* e da computação de alto desempenho. Estas novas capacidades colocam à disposição dos investigadores uma coleção de serviços e ferramentas em ambientes virtuais de desenvolvimento na *cloud* orientados aos requisitos específicos dos utilizadores. A estratégia de desenvolvimento da SDN\SDC é feito em estreita colaboração com redes, comunidades e outras infraestruturas: *Science*, *EMODnet*, *Copernicus Marine Environmental Monitoring Service* (CMEMS) e *EuroGOOS* (Schaap e Fichaut, 2017b).

## 2. EVOLUÇÃO ESPERADA COM OS PROJETOS EMODNET E SDC

As divisões técnicas do IH participam nos diferentes grupos temáticos da rede EMODnet desde as fases preliminares de edificação da rede, contribuindo com o *know-how* dos investigadores e com dados para os portais temáticos.

Os principais desenvolvimentos que são atualmente perseguidos são (EMODnet Secretariat, 2017):

- Produzir o mapa das bacias marinhas europeias com uma maior resolução recorrendo à assimilação de novos dados batimétricos que permitem um adensamento das malhas já

disponibilizadas no portal EMODnet *Bathymetry*;

- Desenvolver a assimilação de novas tipologias de dados, como os fluxos de água doce dos rios europeus;
- Assimilar dados que permitam melhorar o conhecimento da distribuição espacial dos plásticos.
- Criar uma ferramenta de *crowdsourcing* que permita a assimilação de dados classificados como dados abertos marinhos. Existe uma forte convicção que existem muitos dados com interesse para a comunidade, fora das redes e infraestruturas europeias, que importa assimilar através um processo de facilitação do trabalho de quem contribui.

A rede EMODnet tem apresentado uma estratégia de desenvolvimento baseada no incremento dos nós da rede através da cativação de centros de dados europeus familiarizados com as cadeias de gestão de informação marinha, desde a aquisição dos dados, passando pelos processos de processamento e controlo de qualidade, finalizando no arquivo dos dados e informação, e, por fim, a gestão da disponibilização da informação e conhecimento à comunidade científica. A grande novidade nos desenvolvimentos da rede EMODnet está a ser a implementação de um novo portal que pretende dotar a rede da capacidade de *crowdsourcing*. Esta inovação oferece alguns desafios, e.g. a promoção do processo e as ações de *marketing* orientada a uma comunidade não familiarizada com as questões técnicas da gestão de informação.

O projeto *EMODnet Ingestion and safe-keeping of marine data* tem como objetivo a edificação da componente de *crowdsourcing*. O *Data Ingestion Portal*, a portal de entrada do projeto, está acessível no endereço: <https://emodnet-ingestion.eu/>.



Fig. 2. Vista do EMODnet Data Ingestion Portal (EMODnet, 2017).

A submissão de dados no portal é um processo simples, começa com a criação de um *MarineId* que identifica o utilizador na rede EMODnet. Após este passo inicial, a submissão de dados consiste no

preenchimento de um formulário de metadados que acompanha o conjunto de dados submetido no portal numa pasta comprimida (*Zip folder*) (Fig. 3).

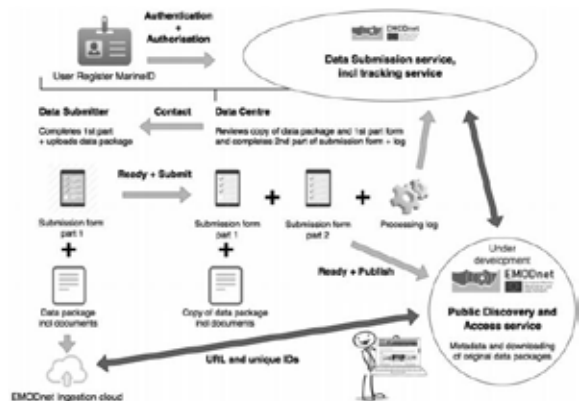


Fig. 3. Perspetiva do processo de submissão de dados no Data Ingestion Portal. Extraído de Schaap (2017).

Depois de concluída a fase I do processo de submissão, dá-se início à segunda fase durante a qual os centros de dados nacionais da rede EMODnet realizam a análise da completude do formulário preenchido na fase I e procedem a uma análise da coerência dos formatos de dados. Após este estágio, realizam o processo de harmonização dos dados por forma a ficarem compatíveis com os diversos catálogos e acessíveis nos diferentes portais temáticos da rede EMODnet e infraestruturas europeias (Fig. 4).

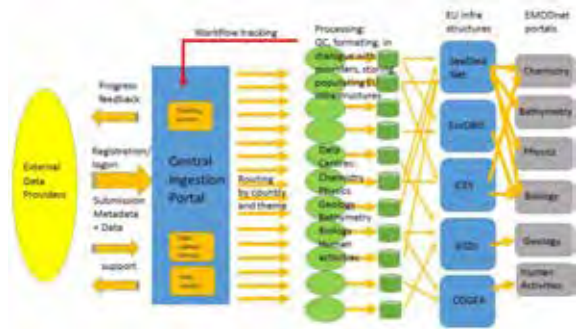


Fig. 4. Workflow do processo de submissão e assimilação de dados. Extraído de Schaap (2017).

Através do processo descrito atrás é possível combinar o *know-how* técnico dos centros de dados com o cidadão para maximizar o valor dos dados e informação, gerando um benefício comum para toda a comunidade de utilizadores.

O *Data ingestion portal* apresenta também um serviço facilitador do processo de procura de dados – o *Data Wanted service* (<https://www.emodnet-ingestion.eu/data-wanted>). Com este serviço os utilizadores identificados com um *marineID* em busca de conjuntos de dados específicos podem dar a conhecer à comunidade EMODnet as suas necessidades através da publicação de *posts* descrevendo os dados ou informação procurada. A comunidade EMODnet tem-se esforçado por criar

sinergias entre os utilizadores através de ferramentas facilitadoras e inovadoras como o *Data wanted Service*. A Fig. 5 apresenta uma visão geral sobre a organização da rede EMODnet.

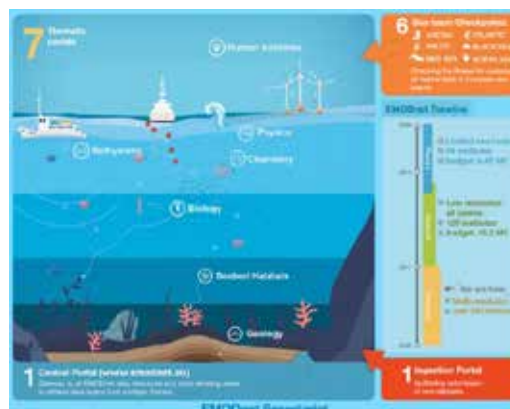


Fig. 5. “EMODnet at a Glance”. Extraído de EMODnet Secretariat (2017).

O projeto SDC é a edição atual de desenvolvimento da infraestrutura SDN (Fig. 6) estando integrado no programa H2020. Com o SDC o consórcio está a trabalhar no desenvolvimento tecnológico, na integração de novas capacidades de processamento e de processos de geração automático de conhecimento. Os dois campos principais de inovação são: a integração da capacidade de *semantic web* e *machine-to-machine services and interfaces*, e o desenvolvimento de um *Virtual Research Environment* (VRE) que coloca à disposição dos investigadores as capacidades de processamento de alto desempenho através de servidores virtuais na *cloud*. Isto é conseguido com parcerias com as infraestruturas como a EUDAT Collaborative Data Infrastructure (CDI) (Fig. 7).

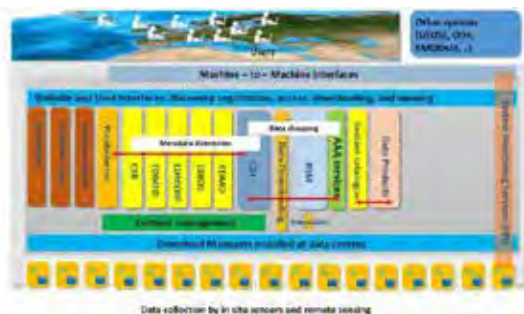


Fig. 6. Arquitetura atual da infraestrutura SDN. Extraído de Schaap e Fichaut (2017a).



Fig. 7. Arquitetura futura SDN/SDC. Extraído de Schaap e Fichaut (2017a).

O resultado esperado com os desenvolvimentos é tornar mais eficientes os acessos aos serviços e ferramentas disponíveis na infraestrutura e continuar a tornar acessíveis os dados marinhos nos catálogos da infraestrutura (Fig.8).

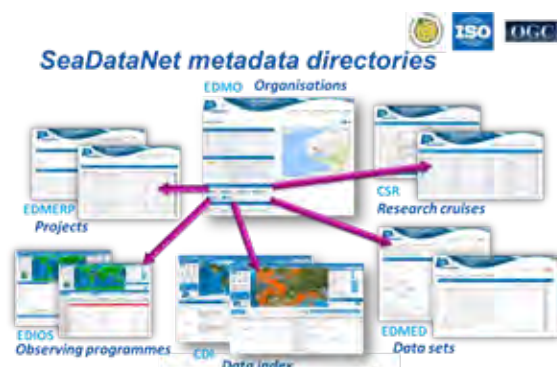


Fig. 8. Catálogos da infraestrutura SDN. Extraído de Schaap e Fichaut (2017a).

Com os desenvolvimentos operados existe a ambição que a infraestrutura SDN/SDC e a rede EMODnet continuem a agregar cada vez mais recursos informacionais do meio marinho e que continuem a ser referências no contexto europeu.

### 3. CONCLUSÃO

As infraestruturas de informação geográfica assumiram um papel preponderante no contexto regional. A partilha de dados de qualidade é hoje reconhecida como vetor fundamental para entender o mundo que nos rodeia.

Os dois exemplos apresentados no artigo demonstram que as sinergias criadas em torno de projetos europeus com instituições de uma ampla distribuição espacial, contextos e realidades muito diferentes, são importantes para criar comunidades de investigação e atingir uma agregação de informação que seria impossível de outra forma. Todos estes dados contribuem para um conhecimento global dos processos transfronteiriços. A dimensão destas redes obriga a um investimento de manutenção que dificilmente seria suportável sem o apoio de fundos comunitários.

Os projetos nestas áreas estão alinhados com as estratégias europeias na área da economia azul e com as principais tendências de investigação e desenvolvimento: *crowdsourcing*, *semantic web*, *machine-to-machine interfaces* e *cloud computing*.

Os projetos apresentados continuam o seu ciclo de desenvolvimento com esforços que decorrem desde a década de noventa acumulando dados de vários países e o esforço e conhecimento de investigadores com o objetivo último de contribuir para um melhor ambiente e para o bem comum. É perceção geral que os dados e informação são um recurso dispendioso de adquirir que é muito importante preservar, explorar e partilhar. Só assim os dados guardados

em vários centros europeus ao longo de várias décadas podem contribuir para um conhecimento cada vez mais exato dos processos ambientais e possibilitar melhores decisões regionais para gestão do ambiente.

### Agradecimentos

O projeto SDC é financiado pelo programa H2020 através do *grant agreement* 730960. O projeto *EMODnet Ingestion and Safe-keeping of marine data* é objeto de financiamento pelo *European Maritime and Fisheries Fund* (EMFF) através do contrato: EASME/EMFF/2015/1.3.1.3/SI2.727770.

### REFERÊNCIAS

- Comissão Europeia 2012. COM(2012) 473 final - Green Paper Marine Knowledge 2020: from seabed mapping to ocean forecasting.
- Comissão Europeia 2014. COM(2014) 254 final - Marine Knowledge 2020: roadmap.
- Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries 2018. Ares(2018)316404 - Evaluation of the European Marine Observation and Data Network (EMODnet).
- EMODnet. 2017. *EMODnet Data Ingestion Portal* [Em linha]. Disponível em: <https://emodnet-ingestion.eu/> [Consult. maio 2018].
- EMODnet Consortium. s.d. *EMODNet - Central Portal* [Em linha]. Disponível em: <http://www.emodnet.eu/> [Consult. maio 2018].
- EMODnet Secretariat 2017. *EMODnet Annual report 2016*.
- Europeia, C. 2016. *Marine data infrastructure study* [Em linha]. Disponível em: [https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/node/3942#\\_ftnref3](https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/node/3942#_ftnref3).
- Schaap, D. 2017. *EMODnet Ingestion and safe-keeping of marine data - 1st Annual Interim Report*.
- Schaap, D.M.A. e Fichaut, M. 2017a. *SeaDataCloud - Further developing the pan-European SeaDataNet Infrastructure for marine and ocean data management*. Em EGU2017 ed.
- Schaap, D.M.A. e Fichaut, M. 2017b. *SeaDataCloud - Further developing the pan-European SeaDataNet infrastructure for marine and ocean data management*. *EGU General Assembly 2017*.
- SeaDataNet Consortium. s.d. *SeaDataNet - PAN-EUROPEAN INFRASTRUCTURE FOR OCEAN & MARINE DATA MANAGEMENT* [Em linha]. Disponível em: [www.seadatanet.org/](http://www.seadatanet.org/) [Consult. maio 2018].

# Estudo da vulnerabilidade costeira à subida do nível médio do mar para Portugal Continental como consequência das alterações climáticas

C. Rocha (1,2), C. Antunes (2) e C. Catita (1,2)

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. carolina.silrocha@gmail.com.

(2) Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa.

**Resumo:** Portugal Continental possui aproximadamente 75% da sua população na zona costeira, assim como diversas infraestruturas de grande importância económica, às quais estão sujeitas aos riscos associados à subida do nível médio do mar (sNMM). Este trabalho constitui um contributo para a implementação da Diretiva Europeia 2007/60/CE que exige a cada estado membro a avaliação da vulnerabilidade, fundamental para as estratégias de adaptação às alterações climáticas, associada à sNMM e às inundações causadas pela ocorrência de eventos extremos. Desta forma, foi avaliada para 2050 e 2100 com diferentes cenários de sNMM e diferentes períodos de retorno de eventos extremos, a área de terreno em Portugal Continental afetada pela sNMM, para a qual foi produzida uma cartografia de vulnerabilidade física costeira. Os resultados deste estudo são disponibilizados através de um Web Map Service (WMS) para entidades públicas portuguesas, no âmbito de protocolos estabelecidos com Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

**Palavras-chave:** Diretiva Europeia 2007/60/CE, subida do nível médio do mar, vulnerabilidade costeira, sistemas de informação geográfica, WMS.

## 1. INTRODUÇÃO

Considerando que vivem atualmente em Portugal milhares de pessoas em zonas costeiras com risco potencial de serem afetadas pela subida do nível médio do mar (sNMM), bem como, a existência de infraestruturas de elevada importância económica, sejam elas de transportes, de administração pública e serviços, de turismo, ou de outra qualquer atividade, o risco associado à sNMM aumentará progressivamente no futuro, à medida da taxa de subida e ao aumento da exposição ao risco. A avaliação da vulnerabilidade à sNMM das zonas urbanas costeiras é de crucial importância para a adoção de medidas e estratégias de adaptação às alterações climáticas.

O cumprimento dos requisitos impostos pela Diretiva Comunitária 2007/60/CE, transposta para a lei nacional através do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro, obriga as instituições nacionais a elaborar a cartografia de risco, identificando, numa primeira fase as zonas de maior vulnerabilidade, e numa segunda fase, a execução da respetiva cartografia de risco com o máximo rigor posicional. As zonas costeiras do território continental nacional são assim identificadas pelos autores deste estudo.

A metodologia apresentada, baseia-se na tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilitando a elaboração da cartografia de vulnerabilidade face aos cenários de sNMM projetados para a costa portuguesa e para os horizontes temporais de 2050 e 2100.

## 2. METODOLOGIA

O processo metodológico aplicado encontra-se esquematizado na Fig. 1. Numa primeira etapa fez-se a recolha e organização de toda a informação necessária à construção do modelo proposto. Essa informação, foi obtida maioritariamente, em fontes de domínio público e da informação oficial e não oficial disponibilizada pelos diversos organismos nacionais (APA, DGT e IH).



Fig. 1. Fluxo de processo da metodologia para a obtenção da cartografia de vulnerabilidade costeira em Portugal Continental.

### 2.1. Cenários de extremos do Nível do Mar

Os diferentes cenários de sNMM para 2050 e 2100 com diferentes períodos de retorno de eventos extremos foram calculados com base na informação dos marégrafos de Leixões, Cascais, Lisboa e Lagos. Assim, foi possível dividir e caracterizar o território

em quatro zonas: Norte, Centro, Alentejo e Algarve, respetivamente. Com exceção dos dados do marégrafo de Cascais, os valores para Leixões, Lisboa e Lagos resultam de séries de dados mais curtas e incompletas com dados entre 1970 e 2010. Os registos de valores extremos de sobrelevação meteorológica (SM) foram caracterizados, em termos de frequência e amplitude, através de uma análise de extremos seguindo a metodologia apresentada em Vieira *et al.* (2012). Com esta análise obtiveram-se curvas de períodos de retorno para cada porto maregráfico.

Considerando os valores de projeção de sNMM de Antunes (2016), foram ainda calculados os percentis de submersão de maré para os dois períodos dos cenários em estudo, 2050 e 2100, adicionando-se os valores respetivos de projeção do NMM. Sobre estas curvas de referência das frequências de submersão do nível do mar projetado, foi adicionada a SM para dois períodos de retorno (1):

$$\text{Nível Extremo} = \text{Maré} + \text{SM} + \text{sNMM} \quad (1)$$

A partir das curvas de percentil de submersão anual resultantes (Fig. 2) são extraídas as cotas para cada cenário de inundação para níveis extremos, correspondentes ao percentil de 0.25% (máxima preia-mar).

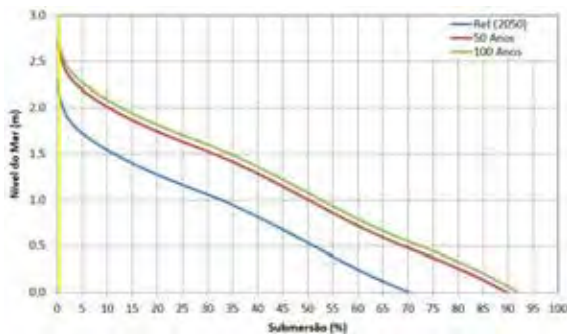


Fig. 2. Curvas de percentil de submersão para o NMM em 2050. linha amarela intersecta as 3 curvas de percentil para o valor 0.25% de submersão, partindo da maré de 2015.

De modo a incorporar os cenários de sNMM e a sua incerteza no índice de vulnerabilidade foi calculado, com recurso a um Modelo Digital de Terreno (MDT) de 20 m de resolução espacial, o nível de inundação em cada ponto, isto é, a altura de coluna de água da zona inundada. O índice de perigosidade de inundação (IPI), de 1 a 5, é então calculado considerando a incerteza dos modelos de frequência de submersão, que resultam da estimativa do desvio padrão dos níveis de maré, da SM e da sNMM:

$$\sigma_{\text{cenário}} = \sqrt{\sigma_{\text{maré}}^2 + \sigma_{\text{SM}}^2 + \sigma_{\text{sNMM}}^2} \quad (2)$$

O valor de incerteza de cada cenário depende assim do ano de projeção, obtiveram-se valores de desvio padrão para 2050 e 2100 de 12 cm e 40 cm, respetivamente.

Com base nas incertezas estimadas por (2) é calculada a curva padrão de distribuição Normal (Fig. 3), a partir da qual se determina a

probabilidade de inundação. Dividindo o domínio de probabilidade em cinco níveis obtêm-se os IPI, de 1 (menor probabilidade, de 0 a 20%) a 5 (máxima probabilidade, de 80 a 100%), relativos ao forçamento costeiro de inundação (Tabela I).

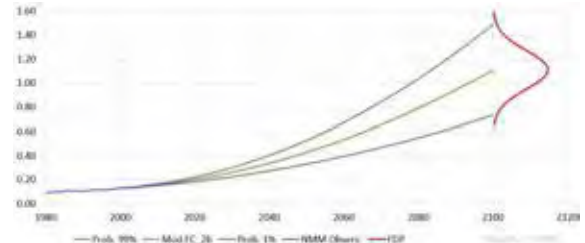


Fig. 3. Modelo de projeção do NMM relativo, Mod.FC\_2 (modelo 2 da FCUL), baseado na análise dos dados do marégrafo de Cascais, de 1992 a 2016 (Antunes, 2016).

A Fig. 3 mostra a distribuição de probabilidade condicional de inundação centrada no valor de cota de um perfil topográfico, na qual se pode verificar que mesmo em zonas de cota superior ao nível determinístico de inundação, existe uma probabilidade de inundação, devido à incerteza dos parâmetros usados para a estimar. Quanto mais precisos forem os dados e os modelos, menor área sobrelevada será classificada com perigosidade.

Tabela I. Classificação do parâmetro "Forçamento Costeiro" no Índice de Perigosidade de Inundação, com base na probabilidade de cada cenário de inundação.

Índice de Perigosidade	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Extremo
	1	2	3	4	5
Forçamento Costeiro	≤ 20%	20% - 40%	40% - 60%	60% - 80%	≥ 80%

### 2.2. Parâmetros físicos de Vulnerabilidade

A escolha dos parâmetros de vulnerabilidade pode ser complexa e depende muito da análise que se pretenda realizar. Para este trabalho foram selecionados seis parâmetros físicos de vulnerabilidade, para serem avaliados e classificados individualmente. Cada um dos fatores foi classificado numa escala de 1 a 5, de modo a expressar o seu contributo para a vulnerabilidade costeira, sendo 5 o nível mais alto e 1 o mais baixo. A Tabela II apresenta a classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos selecionados. Em Rocha (2016), descreve-se com maior detalhe os critérios de escolha dos parâmetros de vulnerabilidade utilizados.

Tabela II. Classificação dos parâmetros físicos de vulnerabilidade para Portugal Continental.

	1 - Muito Baixo	2 - Baixo	3 - Moderado	4 - Alto	5 - Extremo
Rede hidrográfica	Distância à rede > 200 m	150 m - 200 m	100 m - 150 m	50 m - 100 m	≤ 50 m
Declive do Terreno	> 5%	2% - 5%	1.5% - 2%	0.5% - 1.5%	≤ 0.5%
Tipo de costa	Costa de arenos				Costa rochosa e arenosa
Distância à linha de costa	> 1000 m	200 m - 1000 m	50 m - 200 m	20 m - 50 m	≤ 20 m
Geologia	Rochas Evaporitas	Plúcticas e Volcânicas	Sedimentares e Metamórficas		Formação Sedimentares
Litologia	argilas, areias	pedra úmida		pedras, depósitos	argilas, areias, cascalhos
Uso do solo	superf. de água, vacante, vegetação, silvicultura, rochas fiéis	áreas costeiras	terrace	agrícolas	industrializadas, urbanas e turísticas

### 2.3. Processo de análise hierárquica (AHP)

Para a criação do Índice de Vulnerabilidade foi utilizado o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty nos anos

70. Este método permite hierarquizar um conjunto de parâmetros avaliados em função de um conjunto de critérios. Como resultado, obtêm-se os pesos dos parâmetros usados na ordenação das alternativas a partir de uma matriz onde o decisor efetua comparações de relação de importância entre os critérios característicos das diferentes alternativas. Para cada parâmetro utilizado obtiveram-se os pesos apresentados em (3).

$$IVF_{Peso} = \frac{IPI \times 34\% + RH \times 21\% + TC \times 15\% + DLC \times 15\% + G \times 9\% + L \times 4\% + US \times 2\%}{100\%} \quad (3)$$

onde, **IPI** – Índice de Perigosidade de Inundação, **RH** – Rede Hidrográfica, **TC** – Tipo de Costa, **DLC** – Distância à Linha de Costa, **G** – Geologia, **L** – Litologia e **US** – Uso do Solo.

De realçar, que os resultados do método AHP dependem da perspetiva dos decisores relativamente à importância de cada critério utilizado.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade

De acordo com a metodologia apresentada anteriormente, foram determinadas as cotas mínimas e máximas de cada intervalo de probabilidade correspondente aos cinco níveis de perigosidade de inundação (Tabela III), depois utilizados para a construção dos cenários de inundação e, a partir deste, construir o modelo de vulnerabilidade física costeira.

Tabela III. Intervalos de cotas de inundação de cada nível de IPI e respetiva probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM, para 2050 e 2100.

Probabilidade de Ocorrência	2050, PR100, M+SM+sNMM				2100, PR100, M+SM+sNMM			
	Norte e Centro Ref: 2.8 m		Alentejo e Algarve Ref: 2.7 m		Norte e Centro Ref: 3.5 m		Alentejo e Algarve Ref: 3.4 m	
	m	m	m	m	m	m	m	
0.25% a 20%	2.40	3.25	2.80	3.45	3.95	4.85	3.85	4.75
20% a 40%	2.60	2.90	2.70	2.90	3.60	3.95	3.60	3.65
40% a 60%	2.75	3.80	2.85	2.70	3.35	3.80	3.25	3.50
60% a 80%	2.65	2.75	2.55	2.65	3.05	3.35	2.90	3.25
80% a 95%	2.50	2.65	2.40	2.55	2.85	3.00	2.70	2.90
incerteza do cenário	33 cm				40 cm			

A avaliação dos cenários de inundação centrou-se na determinação das áreas com probabilidade de inundação para os dois cenários de sNMM e, com base nos cenários de vulnerabilidade e na informação existente dos Censos2011, estimaram-se o número de alojamentos e residentes existentes nas áreas consideradas como vulneráveis.

1. Para 2050, estimou-se 903.2 km<sup>2</sup> de área suscetível de ser inundada devido à sNMM, sendo Lisboa o distrito que apresenta uma maior área com probabilidade de inundação com 221.4 km<sup>2</sup>. Ao nível da vulnerabilidade física, o distrito de Lisboa apresenta a maior área de vulnerabilidade física, com cerca de 221.4 km<sup>2</sup>, onde 92.7% é classificada como vulnerabilidade alta e extrema, tendo ainda 15499 alojamentos e 24682 residentes nas áreas vulneráveis (Tabela IV).

2. Em 2100 estima-se 1146 km<sup>2</sup> de área, aproximadamente, com probabilidade de inundação, sendo que 74.6% dessa área é classificada no nível extremo. O distrito de Lisboa será novamente o mais afetado com 249.6 km<sup>2</sup> (Fig. 4).



Fig. 4. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 100 anos.

Lisboa, é novamente o distrito que apresenta uma área maior de vulnerabilidade física, com cerca de 249.6 km<sup>2</sup> e, terá 17472 alojamentos e 27824 residentes afetados pela sNMM (Fig. 5 e Tabela V).



Fig. 5. Cenário de Vulnerabilidade Física Costeira para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 100 anos.

### 3.3. Aplicação WEB

Com o objetivo de partilhar os resultados deste estudo com o público, foi criada uma aplicação Web, alojada no portal SMARTCAMPUS da FCUL e que recorre à tecnologia ESRI® para a disponibilização de toda a cartografia produzida (Fig. 6).



Fig. 6. Página inicial da aplicação, disponível em: <https://smart.campus.ciencias.ulisboa.pt/portal/home/>.

Esta aplicação, interativa, permite ao utilizador consultar os resultados para a cartografia de inundação e de vulnerabilidade de forma comparativa entre os anos 2025, 2050 e 2100, bem como, obter mais informação relativa às tabelas aqui apresentadas (Tabela IV e Tabela V) para os horizontes de 2050 e 2100 (Fig. 7).



Fig. 7. Exemplo do que se pode consultar na aplicação Web.

Tabela IV. Áreas dos distritos para cada nível do índice de vulnerabilidade física costeira, bem como o número de alojamentos e residentes afetados, para o ano de 2050.

Distritos	Área (km <sup>2</sup> )	Ano 2050, PR100Anos, M+SM+sNMM					TOTAL	Nº Alojamentos	Nº Residentes	
		1 - Muito Baixo	2 - Baixo	3 - Moderado	4 - Alto	5 - Muito Alto				
Faro	4996.80	0.06	2.75	11.95	65.24	102.34	183.16	3.67%	15066	15199
Beja	19263.32	0.01	0.18	1.83	4.36	0.21	5.79	0.06%	27	28
Setúbal	5214.06	0.05	4.78	17.45	93.88	20.65	182.71	3.50%	5683	6012
Lisboa	2816.14	0.01	0.53	15.61	151.78	53.47	166.48	5.91%	15499	24682
Santarém	6718.35	0.00	0.48	15.97	55.07	27.54	107.05	1.61%	668	1095
Leiria	3505.70	0.15	2.36	7.14	9.96	0.61	20.28	0.58%	734	539
Coimbra	3973.73	0.01	0.38	5.48	28.26	8.98	44.35	1.12%	1035	1199
Aveiro	2800.94	0.01	0.65	12.55	55.10	103.10	168.14	6.00%	15828	24081
Porto	2331.70	0.02	0.20	0.87	1.13	0.26	2.60	0.11%	606	1007
Braga	2706.11	0.00	0.06	0.71	1.82	1.13	3.89	0.14%	702	847
Viana do Castelo	2218.84	0.04	0.97	4.67	8.02	4.21	17.71	0.80%	1175	1548
<b>Total</b>	<b>47545.77</b>	<b>0.35</b>	<b>13.40</b>	<b>94.22</b>	<b>472.61</b>	<b>322.47</b>	<b>903.06</b>	<b>1.90%</b>	<b>49225</b>	<b>63682</b>

Tabela V. Áreas dos distritos para cada nível do índice de vulnerabilidade física costeira, bem como o número de alojamentos e residentes afetados, para o ano de 2100.

Distritos	Área (km <sup>2</sup> )	Ano 2100, PR100Anos, M+SM+sNMM					TOTAL	Nº Alojamentos	Nº Residentes	
		1 - Muito Baixo	2 - Baixo	3 - Moderado	4 - Alto	5 - Muito Alto				
Faro	4996.80	0.11	6.60	22.03	75.88	108.14	211.78	4.24%	18463	17575
Beja	19263.32	0.01	0.42	2.17	4.48	0.21	6.39	0.06%	29	29
Setúbal	5214.06	0.36	11.02	27.66	111.02	24.08	223.85	3.29%	7208	10168
Lisboa	2816.14	0.04	1.81	16.02	174.92	56.79	189.39	6.73%	17472	27824
Santarém	6718.35	0.00	1.84	39.47	83.18	28.44	163.23	2.43%	1031	1690
Leiria	3505.79	0.38	4.92	13.86	14.07	0.82	34.15	0.97%	1235	908
Coimbra	3973.73	0.05	1.82	7.05	34.48	10.02	57.82	1.46%	1360	1575
Aveiro	2800.94	0.01	2.70	31.72	74.10	110.10	214.74	7.67%	20188	30715
Porto	2331.70	0.07	1.13	2.48	1.61	0.38	5.82	0.25%	1354	2237
Braga	2706.11	0.00	0.17	2.67	2.99	1.57	7.82	0.29%	1436	1732
Viana do Castelo	2218.84	0.18	3.29	6.98	12.43	5.22	30.72	1.38%	2037	2685
<b>Total</b>	<b>47545.77</b>	<b>1.21</b>	<b>35.72</b>	<b>175.85</b>	<b>589.22</b>	<b>343.74</b>	<b>1145.73</b>	<b>2.41%</b>	<b>62453</b>	<b>80034</b>



## Desenvolvimento de um portal de dados do ambiente marinho

R. Melo (1), R. Santos (1), A. Rodrigues (1) e J. Catalão (2)

- (1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; [anaraquel.melo@hidrografico.pt](mailto:anaraquel.melo@hidrografico.pt).  
(2) Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, Lisboa.

**Resumo:** A informação do ambiente marinho, adquirida pela divisão de Geologia Marinha ao longo das últimas décadas está registada em distintos suportes com formatos, origens e datas diferentes, o que implica restrições ao seu acesso e utilização. O desenvolvimento de um portal de dados, em *MapServer*, irá solucionar esta problemática, por integrar informação harmonizada e permitir a interação do utilizador com os metadados, estabelecendo a ligação de uma forma remota à base de dados uniformizada (implementada em *PostGIS*). A informação utilizada é multidisciplinar, abrangendo um intervalo temporal que vai desde os dados históricos recuperados aos mais recentes. O portal resultante apresenta um conjunto de ferramentas personalizadas em função das necessidades do utilizador, possibilitando o acesso e exploração dos metadados de uma forma simples, intuitiva e interativa.

**Palavras-chave:** Portal, *MapServer*, *PostGIS*, dados históricos, metadados.

### 1. INTRODUÇÃO

A crescente digitalização da sociedade tem como consequência um progressivo aumento dos dados e da informação acessível ao cidadão. Deste modo, os sistemas digitais têm um papel relevante no sentido em que podem proporcionar o arquivo, a gestão e o acesso à informação (Melo, 2017). Os dados do ambiente marinho adquiridos, nas últimas décadas, pela divisão de Geologia Marinha (GM), encontram-se guardados e arquivados sob diversas formas e formatos e em diferentes suportes obtidos com diferentes equipamentos. Estes factos têm implicado restrições no acesso e gestão desta informação não harmonizada, sendo incontornável uma solução que integre uma base de dados harmonizada (Melo *et al.*, 2016), de forma a tornar possível a sua disponibilização. A disseminação desta informação, por meio de uma infraestrutura de dados espaciais (IDE), vem criar o ambiente adequado para a interação do utilizador com os metadados.

Peng e Tsou (2003) referem que a aplicação das novas tecnologias de informação e comunicação têm suscitado um grande impacto ao nível das ferramentas SIG. Com a sua crescente importância, principalmente ao nível da internet, os SIG *desktop* evoluíram para os SIG Distribuídos (SIGD), fazendo com que os *WebSIG* sejam encarados, hoje em dia, como uma potencial ajuda às pessoas na prestação de serviços dinâmicos e inovadores. Assim sendo, considera-se uma mais-valia a implementação de um portal para a gestão dos dados marinhos.

Bonnici (2005) refere que o facto de se partilhar informação geográfica com utilizadores, que interagem com bases de dados SIG, na internet, está dependente das capacidades do programa, já que dá a liberdade de se poder consultar, exibir e analisar

remotamente a informação geoespacial, por meio de uma interface de navegador da internet (*Web*).

Este trabalho tem como objetivo a implementação de uma base de dados geográfica e a disponibilização de um conjunto de informação, através de um portal desenvolvido com ferramentas personalizadas em conformidade com as necessidades da GM. Na implementação da base de dados e no desenvolvimento do portal, tal como nas ferramentas, utilizou-se *software* de código aberto e gratuito, seguindo as diretivas nacionais de incentivo à utilização deste tipo de programas na Administração Pública.

### 2. IMPLEMENTAÇÃO DO PORTAL

#### 2.1. Origem dos dados

Os dados utilizados, na elaboração deste trabalho, incluem um período que abrange dados históricos e os mais recentes. Estes últimos foram adquiridos no âmbito do projeto “Caracterização ambiental da área de expansão marítima do porto de Sines e região envolvente”, solicitado ao Instituto Hidrográfico pelo porto de Sines e realizado no período de 27/01/2011 a 29/02/2012 (Rodrigues *et al.*, 2012). Na concretização deste projeto, estiveram envolvidas várias áreas das ciências marinhas, nomeadamente, a geologia marinha, a oceanografia física e geológica, a hidrografia e cartografia, a geologia costeira e a química marinha. No que se refere aos dados históricos, foram tidos em conta os correspondentes às linhas de reflexão sísmica em suporte analógico que têm vindo a ser recuperados para o projeto SISPLAT (Melo *et al.*, 2016).

#### 2.2. Metodologia

O procedimento efetuado para a concretização deste estudo passou pela utilização de soluções de código

aberto aplicáveis à administração pública (AP) (Trezentos e Simão, 2004).

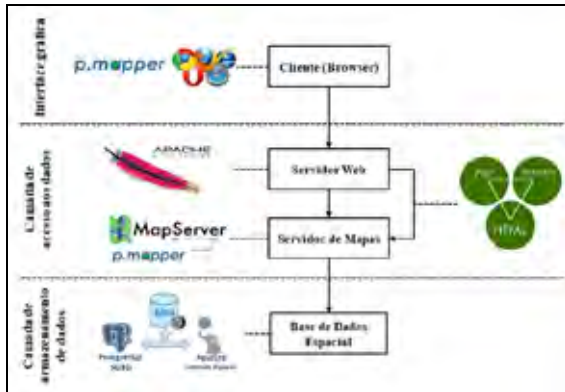


Fig. 1. Aplicações e linguagens utilizadas (Melo, 2017).

A Figura 1 ilustra as aplicações e as linguagens usadas, destacando as várias etapas, sendo:

- **Apache Web Server** — considerado uma referência em termos de solução de internet.
- **MapServer** — servidor de mapas.
- **p.Mapper** — *framework* de *webmapping*, baseado em *MapServer*, e desenvolvido em PHP/PHP-Mapscript.
- **PostGIS** — extensão espacial que permite efetuar o geoprocessamento, análise e armazenamento da informação geoespacial, vetorial ou *raster*, numa base de dados *PostgreSQL*.
- **PostgreSQL** — Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD) de código aberto, mais avançado que o SGBD *MySQL* em que é usado o *pgAdmin4* como interface gráfica.

O servidor de mapas *MapServer* e a *framework* *p.Mapper*, bem como a base de dados geográfica *PostGIS*, seguem as especificações de padrões abertos do *Open Geospatial Consortium* (OGC).

### 2.3. Disponibilização da informação na internet

Após a implementação da base de dados geográfica em *PostGIS*, estruturada em função das três áreas técnico-científicas que entraram para o estudo, a geologia marinha, a hidrografia e a oceanografia, estão definidos os requisitos para o desenvolvimento do portal. Na aplicação *p.Mapper*, o ciclo que a informação tem de percorrer até chegar ao utilizador de uma forma simples, acessível e intuitiva é mostrado na Figura 2. A leitura que se pode fazer desta representação é que o processo se inicia com a construção da base de dados espacial, em *PostgreSQL/PostGIS*, na qual a informação é acumulada em tabelas. Como estas serão alimentadas com geoinformação, é importante frisar que é fundamental que se crie uma coluna para o campo correspondente à geometria em que cada registo recebe a sua descrição espacial.

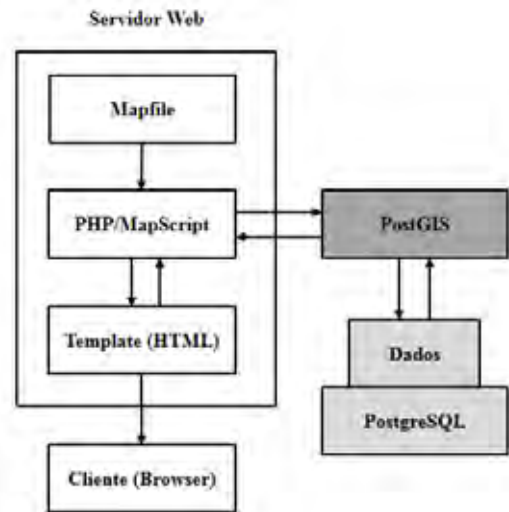


Fig. 2. Conexão das camadas de informação ao *PostGIS* na aplicação *p.Mapper* (adaptado de Singh et al., 2012).

Posteriormente, estas tabelas são chamadas pelo servidor de mapas *MapServer/p.Mapper*, através do ficheiro *Mapfile*, com base nas seguintes linhas de código:

```
CONNECTIONTYPE POSTGIS
CONNECTION "dbname=BDGM user=postgres host=localhost password=postgres port=5432"
DATA "geom FROM nome_tabela USING UNIQUE gid USING SRID=?"
```

Estas linhas traduzem a seguinte terminologia:

- **CONNECTIONTYPE** — tipo de ligação, isto é, nome da extensão espacial.
- **CONNECTION** — parâmetros de conexão, especificamente, o nome da base de dados que contém a tabela espacial a ser carregada, o *username*, o *host*, a *password* e a porta de configuração.
- **DATA** — nome da coluna em que está inserida a geometria, nome da tabela espacial, o campo referente à chave primária e o SRID (identificador de sistema de referência espacial). Deste modo, o *MapServer* acede aos dados *PostgreSQL/PostGIS* com a potencialidade de poder exibir a informação, que consta nas tabelas da base de dados *PostgreSQL*, usufruindo do *PostGIS* como suporte de expansão espacial.

No ficheiro *Mapfile*, está contida toda a informação considerada relevante e que foi utilizada para personalizar a plataforma. A estruturação do ficheiro torna possível visualizar a informação geoespacial, recorrendo à configuração de determinadas características, tais como as cores, os símbolos, a legenda e a escala.

A aplicação foi construída e estruturada com a finalidade de proporcionar ao utilizador navegar e efetuar pesquisas, usufruindo de ferramentas apropriadas para dar resposta ao que for solicitado. Deste modo, o diagrama apresentado na Figura 3 explica, sucintamente, os papéis a desempenhar pelo utilizador e pelo administrador criados nesta plataforma.

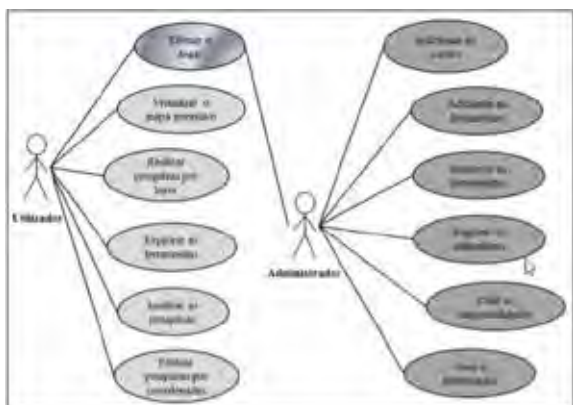


Fig. 3. Caso de uso para este protótipo (Melo, 2017).

Verifica-se que o utilizador tem, apenas, a função de explorar a informação, enquanto que o administrador tem a responsabilidade de proporcionar as condições necessárias para que tal se concretize.

Assim, este último tem como tarefas adicionar as *layers*, inserir e remover as ferramentas, registar os utilizadores, criar as funcionalidades e gerir a informação.

Quanto ao utilizador, é-lhe dada a oportunidade de efetuar o *login*, visualizar o mapa interativo, realizar e analisar as pesquisas por *layer*, explorar as ferramentas e efetuar pesquisas, inserindo as coordenadas da área envolvente. O servidor de mapas foi personalizado em consonância com os interesses definidos para este projeto, visando que a aplicação proporcione aos utilizadores a interação de uma forma intuitiva, simples e acessível aos metadados pretendidos. Segundo este ponto de vista,

a barra de ferramentas é constituída por um leque variado de botões a saber: *zoom* (*zoom in* e *zoom out*), de atualização (*zoom full extent* e *reload*), de translação (*pan*), de interrogação (*identify*), de pesquisa (*query editor* e *query*), de localização (*locate XY*) e de impressão. Salienta-se que a ferramenta *query editor* permite efetuar uma pesquisa sobre os dados geoespaciais e a *query* oferece a possibilidade de uma inquirição apenas para a área envolvente que se deseja, através da inserção de coordenadas. Evidencia-se ainda que é possível exportar o resultado de uma pesquisa para o formato PDF (*Portable Document Format*), CSV (*Comma-separated values*) ou *Shapefile* (Figura 4 a) e b)).

Realça-se a vantagem do mapa de referência estar sincronizado com a área de visualização (mapa interativo), proporcionando um enquadramento espacial da informação que está a ser apresentada.

### 3. ANÁLISE DOS PONTOS FORTES E FRACOS DO PORTAL

A análise dos pontos fortes e dos pontos fracos da implementação do portal na divisão de Geologia Marinha estão enumerados na Tabela I. Por analogia com a utilização do *software* de código aberto, podem ser considerados, em parte, como as suas vantagens e desvantagens.

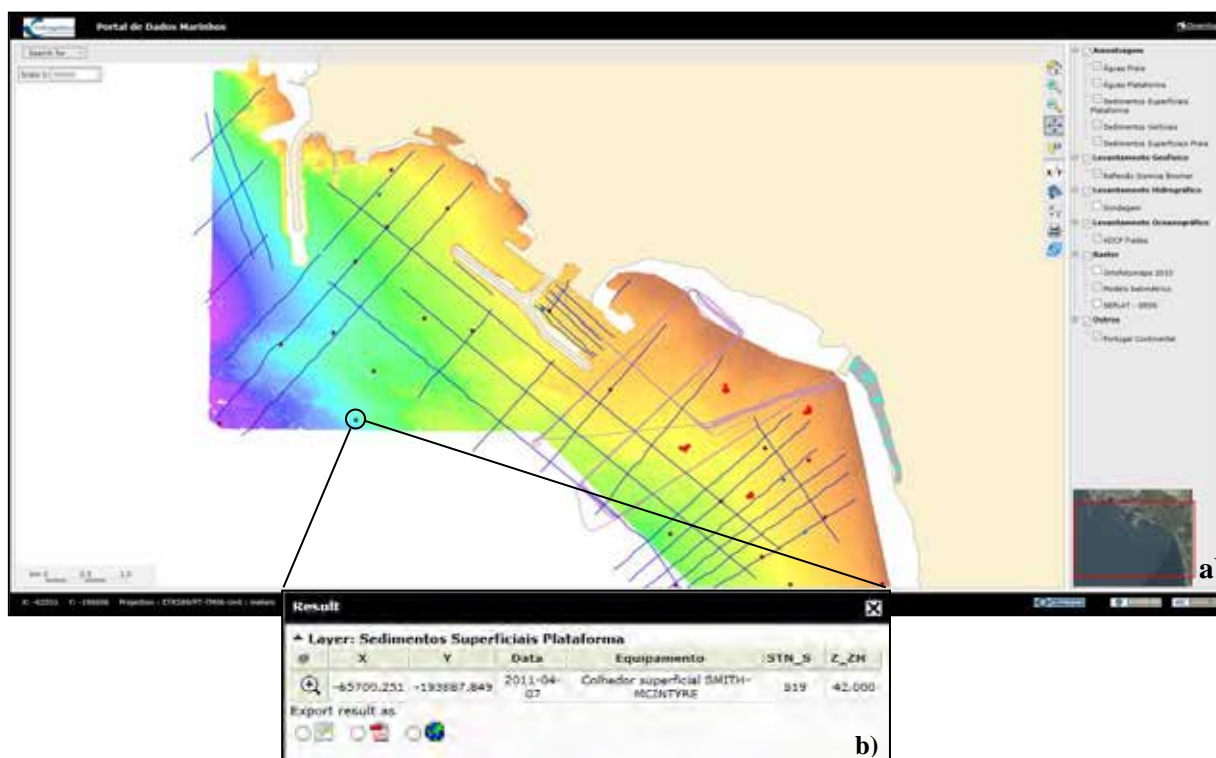


Fig. 4. a) Interface gráfica com todas as camadas de informação ativas; b) Resultado da ferramenta *identify*.

Tabela 1. Pontos fortes e pontos fracos do portal de dados.

Pontos Fortes
<p><b>1. Software de código aberto.</b></p> <p><b>2. Custo de licenciamento</b> – não tem custos de licenciamento.</p> <p><b>3. Sustentabilidade</b> – o seu desenvolvimento, não contabilizando os recursos humanos, tem custos reduzidos.</p> <p><b>4. Acesso</b> – proporciona aos utilizadores uma pesquisa mais rápida da informação existente sobre as observações do mar.</p> <p><b>5. Volume de informação</b> – possibilita a interação com mais pessoas sem conhecimento específico em base de dados.</p> <p><b>6. Reutilização de informação e aproveitamento de recursos</b> – admite interação com os utilizadores, e permite desenvolver aplicações à sua medida.</p> <p><b>7. Necessidade de aceder à informação</b> – garante aos utilizadores o acesso a informação de uma forma expedita, eficiente e segura, atualmente imprescindível.</p> <p><b>8. Ligação remota à base de dados</b> – o utilizador tem acesso aos metadados, através de pesquisas à base de dados.</p> <p><b>9. Interoperabilidade com sistemas existentes</b> – permite que vários utilizadores trabalhem sobre a mesma informação sem a duplicar.</p> <p><b>10. Flexibilidade e adaptabilidade</b> – ajusta-se às necessidades da equipa.</p> <p><b>11. Escalabilidade</b> – a capacidade de trabalhar o código-fonte permite o crescimento da aplicação, sem grandes custos (se forem excluídos os dos recursos humanos).</p> <p><b>12.</b> As pesquisas devolvem listagens que podem ser exportadas para os formatos CSV, PDF e <i>Shapefile</i>.</p> <p><b>13. Maior celeridade</b> no desenvolvimento das atividades internas da divisão.</p>
Pontos Fracos
<p><b>1. Recurso a tecnologia de código aberto:</b> requer recursos humanos altamente qualificados.</p> <p><b>2. Instabilidade no desempenho</b> – o desenvolvimento das ferramentas requer um período de teste, onde o portal pode apresentar uma certa instabilidade no seu desempenho.</p> <p><b>3. Os custos de formação são elevados.</b></p> <p><b>4. A Componente gráfica pode ser mais atrativa.</b></p>

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Portal de dados em ambiente marinho foi criado à medida das necessidades da equipa da GM, detentora de elevado volume de dados históricos, com diferentes formatos e origens. Através de um simples *click* em cima das entidades geográficas, intuitivamente, acede-se à informação adquirida de variadas fontes de dados, e disponível na base de dados. Esta plataforma pode ser considerada como

um gestor de informação geográfica, visando a possível centralização e organização dos vários tipos de informação. O facto do desenvolvimento do portal de dados ter sido totalmente construído e testado com sucesso, com um projeto multidisciplinar, mostra que o *software* de código aberto e gratuito também está operacional, por analogia com os programas proprietários, ao prover a disponibilização de informação remotamente. Tal constatação prova que é possível reduzir na despesa com aquisição de soluções proprietárias, havendo, à partida, outras alternativas informáticas, igualmente válidas e gratuitas, a considerar. Esta aplicação é a base que fica ao dispor de um conjunto de utilizadores e que vai sendo melhorada e otimizada em função das necessidades da divisão, visto permitir que, em qualquer altura, possa ser alterada mediante a introdução de novas funcionalidades.

#### Agradecimentos

À Administração dos Portos de Sines e do Algarve, pretendo agradecer a autorização dada para a utilização dos dados do projeto intitulado “Caraterização Ambiental da área de expansão marítima do porto de Sines e região envolvente”, que serviu para testar o Portal de Dados da Divisão de Geologia Marinha.

#### REFERÊNCIAS

- Bonnici, A.M. (2005) *Web GIS Software Comparison Framework*. Sir Sandford Fleming College. Disponível online no endereço URL: <https://www.scribd.com/document/213970393/Webgis-Framework> (acedido em 09/08/2017).
- Melo, R., Santos, R. and Rodrigues, A. (2016) “Recuperação dos registos de reflexão sísmica - modo analógico para o digital com a máquina fotográfica.” *Actas 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa pp. 385-388.
- Melo, R. (2017). “Desenvolvimento de um Portal de dados do ambiente marinho.” Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, 98pp.
- Peng, Z.R. and Tsou, M.H. (2003) *Internet GIS - Distributed geographic information services for the internet and Wireless Networks*. 1st Edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 679p.
- Rodrigues, A., Oliveira, A. and Santos, A.I. (2012) “Caraterização ambiental da área de expansão marítima do porto de Sines e região envolvente.” Relatório técnico final, Texto não publicado, Instituto Hidrográfico, 1515p.
- Singh, S.P. Chutia, D. and Sudhakar, S. (2012) “Development of a Web Based GIS Application for Spatial Natural Resources Information System Using Effective Open Source Software and Standards.” *Journal of Geographic Information System*, Vol. 4, pp. 261-266.
- Trezentos, P. and Simão, A. (2004) “Software aberto na administração pública.” 1ª Edição, Edição UMIC, Lisboa, 78p.

## Plataforma de observações para avaliação de riscos costeiros e efeitos ambientais

A. Costa (1), L. Oliveira (1), A. Rocha (1)

(1) INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência, [aac@inesctec.pt](mailto:aac@inesctec.pt)

**Resumo:** Este artigo descreve a conceção de uma plataforma de observações desenvolvida no âmbito do projeto MarRISK, com o objetivo de fomentar uma infraestrutura de conhecimento para a avaliação de riscos costeiros e efeitos ambientais causados por potenciais alterações climáticas.

Esta plataforma estende e complementa a infraestrutura do Observatório RAIÁ, com funcionalidades para gestão e análise de séries temporais adquiridas por redes de sensores marinhos, permitindo a monitorização sustentada da evolução dos sistemas costeiros e litorais.

O observatório é geograficamente distribuído e a gestão das plataformas de sensores é da responsabilidade dos parceiros a quem pertencem. O cálculo de indicadores segue o mesmo princípio. Por isso, o *software* assenta em interfaces (APIs) de acesso a dados normalizados e adequados a cada tipo de dados que importa considerar.

Neste sentido, foi já desenvolvida uma interface que permite a pesquisa e visualização de séries temporais, com perceção da disponibilidade e da qualidade das observações, estando em desenvolvimento um módulo de indicadores.

**Palavras-chave:** riscos costeiros, sistema de informação geográfica, ogc, sos, sensorthings api

### 1. INTRODUÇÃO

O MarRISK (0262\_MARRISK\_1\_E) é um projeto cofinanciado pela união Europeia através do Programa INTERREG V-A Espanha-Portugal (POCTEP) e por 13 parceiros de Portugal e da Galiza, que englobam universidades, laboratórios de estado e centros de investigação. A zona de implementação do MarRISK é a Euro-região transfronteiriça do Norte de Portugal e da Galiza. O projeto visa apoiar a implementação de medidas de adaptação às alterações climáticas e mecanismos de prevenção de riscos costeiros.

A exploração das potencialidades do litoral requer um desenvolvimento sustentado e a aplicação de uma política de monitorização contínua do estado da costa (Diário da República, 2009). As zonas costeiras são altamente vulneráveis a processos destrutivos que poem em risco não só a sua integridade física, mas também a biodiversidade costeira, a sociedade, e a gestão urbanística, tornando-se essencial a definição de estratégias de defesa (S. Filipe *et al.*, 2014).

Os riscos costeiros podem ser avaliados pela classificação de zona expostas, evolução da erosão, pelo galgamento das estruturas, pelo risco de inundações ou maremotos, e todos os fatores que causem a destruição e consequente recessão dos sistemas costeiros. Para tal são necessárias estratégias de observação e estudos que avaliem a intensificação destes fatores, recorrendo a ferramentas adequadas para que se possa fazer uma gestão eficaz dos indicadores ambientais.

Melhorar as condições de observação e de estudo contribui para dar uma resposta coordenada e atempada às situações de risco decorrentes das alterações climáticas e para a implementação de um modelo de gestão sustentada do litoral.

#### 1.1. Redes de Observação

As redes de observações recolhem de forma recorrente os dados que fundamentam o estudo da zona costeira. Podem estar incluídas medições físicas, tais como velocidade/direção do vento e das correntes, temperatura do ar e do mar, humidade, radiação, precipitação e salinidade; ou medições bioquímicas e biológicas como a fluorescência, a concentração de oxigénio, de nutrientes e a monitorização da biodiversidade.

Devido à complexidade do meio atmosférico-oceânico, as observações recolhidas não apresentam homogeneidade na representação dos dados. Estes tipos podem ser bastante diversificados, e caracterizáveis em diferentes termos, incluindo: distribuições espaciais (ex: eventos pontuais, dados de áreas e superfícies, perfis e/ou grelhas); distribuições/séries temporais (dados periódicos, horários, frequências); métodos de recolha (automático, manual, satélite, plataformas fixas, boias, navios oceanográficos); qualidade e erros das medições. Para estabelecer uma base de conhecimento fidedigna é fundamental estabelecer processos de controlo da qualidade das variáveis medidas, suportando os processos de validação das observações, por exemplo através da anotação com um índice de qualidade.

A consolidação destas infraestruturas dedicadas à observação do meio marinho permite dar resposta às exigências atuais da oceanografia operacional, dotando a região de meios avançados de monitorização e modelação, proporcionando produtos e serviços que contribuem para um melhor desenvolvimento das atividades económicas ligadas ao mar, tais como o transporte marítimo, segurança marítima e das populações costeiras, turismo e pescas.

## 2. PLATAFORMA DE OBSERVAÇÕES

O observatório é geograficamente distribuído, sendo que a gestão das plataformas de sensores é da responsabilidade dos parceiros a quem pertencem. Os dados adquiridos nem sempre são de fácil acessibilidade devido ao facto de não serem partilhados num formato normalizado. A diretiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*) tem como objetivo promover a acessibilidade e re-usabilidade dos dados de natureza geoespacial. As suas regras asseguram interoperabilidade e compatibilidade na partilha de dados meteorológicos e oceanográficos, garantem a disponibilização de serviços de dados geográficos e estabelecem as normas de acesso e partilha de dados (INSPIRE, 2016).

As normas definidas pelo OGC (Open Geospatial Consortium) têm um papel fundamental nesta definição, sendo recomendadas pela INSPIRE como forma de implementar mecanismos de interoperabilidade entre sistemas e *software*.

A adoção de novas normas de gestão de dados aumenta a complexidade do sistema, e torna-se necessário criar processos específicos de harmonização. Contudo, a compatibilidade dos dados deve ser garantida, para assegurar uma partilha rápida, atempada e inteligível (i.e. interoperabilidade) dos conjuntos de dados adquiridos pelos diferentes intervenientes.

### 2.1. Objetivos da infraestrutura

A plataforma deve ser capaz de catalogar, interrogar e visualizar observações que se podem assumir a forma de séries temporais multivariável, discretas (*datastreams*) ou agregadas (ex: grelhas em formato NetCDF), com dimensão espaço-temporal.

Foi desenvolvida sob a forma de uma aplicação Web, que possibilita o acesso a estes tipos de dados, através da utilização de tecnologias e serviços apresentados neste documento. A Fig. 1 mostra uma arquitetura de alto nível da referida plataforma que interliga os diversos serviços.



Fig. 1. Arquitetura de alto nível da plataforma Web que consolida os vários serviços e normas.

A gestão dos dados segue as normas do OGC, em que as operações são disponibilizadas através de serviços Web e pelas respetivas APIs (*Application Programming Interfaces*), que proporcionam uma forma uniformizada e interoperável de gerir sensores, plataformas, *datastreams*, bem como os diferentes tipos de observações associadas.

### 2.2. OGC Sensor Observation Service

O SOS (Sensor Observation Service) é uma norma que pretende normalizar o acesso a dados de observação de séries temporais adquiridos de todo o tipo de sensores. A norma baseia-se em conceitos da Sensor Web, com o intuito de melhorar os processos de gestão e descoberta dos dados via a web. Em termos de modelo de dados, o SOS adota especificações como o O&M (*Observations & Measurements*) e o SensorML (*Sensor Model Language*) para gerir respetivamente e de forma estruturada, as observações e os procedimentos utilizados para a sua aquisição. O protocolo de comunicação é principalmente baseado no SOAP, que utiliza o formato XML para a troca de dados via HTTP (Open Geospatial Consortium, 2012), embora haja implementações que vão para além da codificação especificada.

### 2.3. OGC SensorThings API

O SensorThings API refere-se a uma norma relativamente recente do OGC, com objetivos semelhantes ao SOS, no que toca à gestão de dados de observação de séries temporais adquiridos por qualquer tipo de sensores. Distingue-se por ter sido desenhada para interagir com dispositivos IoT (*Internet of Things*) de recursos limitados, o que implicou um foco no desempenho (Open Geospatial Consortium, 2016). Em termos pragmáticos, a comunicação e o acesso aos dados é feito através de uma API RESTful (*Representational State Transfer*) que se baseia numa troca de recursos formatada em JSON (*JavaScript Object Notation*). O seu formato distingue-se por trazer menos informação redundante do que aquela que normalmente está presente nas respostas aos pedidos SOAP do SOS.

Outra característica destacada pelos autores do SensorThings é a definição de funcionalidades específicas para comunicação em tempo real com dispositivos, através do protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Este é um protocolo leve para filas de mensagens, orientado para a comunicação entre sensores e dispositivos móveis, reduzindo o *overhead* das mensagens, tornando-o ideal para comunicações de alto desempenho, onde é necessário obter dados de forma atempada (H. Gaston, 2017).



Fig. 2. Modelo de dados do OGC SensorThings sobreposto com a nomenclatura utilizada na plataforma MarRISK.

#### 2.4. THREDDS

Por vezes torna-se vantajoso tratar dados de observação, ou derivados (ex: indicadores) de forma agregada, tais como grelhas multivariável e multi-temporais. Estes tipos de dados são normalmente utilizados nas previsões meteorológicas oceanográficas e atmosféricas (ex: altura das ondas, velocidade e direção do vento, etc) ou a evolução de um indicador com representação espacial ao longo do tempo.

Uma das implementações utilizadas para lidar com este tipo de dados foi o THREDDS Data Server (TDS). Tal como as normas referidas anteriormente, este serviço pretende fortalecer a interoperabilidade e compatibilidade na troca de dados. O TDS recolhe e cataloga dados no formato NetCDF ou através do protocolo OPeNDAP. Posteriormente, disponibiliza acesso nos formatos definidos pelo CDM (*Unidata's Common Data Model*), que incluem o próprio NetCDF e OPeNDAP, GRIB, HDF e NetCDF. Adicionalmente, abrange as normas OGC, e possibilita o acesso aos dados através de subconjuntos de WMS (Unidata, 2018).

#### 2.5. GeoServer

A utilização do GeoServer na infraestrutura fornece um meio de disponibilizar mapas temáticos. Apesar de esta não ser uma forma normalizada de disponibilizar observações, pode ser interessante para publicar visualizações de alto nível (ex: mapas) para alguns indicadores. O GeoServer suporta normas utilizadas de forma recorrente, como o

WMS, WFS e o WCS e auxilia a partilha de informação geográfica (Sun, L. *et al.*, 2015).

#### 2.6. Publicação de dados de observação

Um dos objetivos da plataforma desenvolvida é facilitar o processo de publicação de dados através da utilização de processos de importação amplamente compatíveis, como a uso de ficheiros CSV (*Comma-separated values*). O sistema possibilita a geração de dicionários de dados personalizáveis, de acordo com as definições da série temporal em causa, posteriormente publicados através de um pedido HTTP POST. Esta flexibilidade no formato possibilita que cada parceiro adapte a definição dos seus dados às suas particularidades, independentemente da origem ou do formato original. Pretende-se que os utilizadores sejam capazes de ultrapassar barreiras nos processos de partilha e harmonização de séries temporais, facilitando posteriores atividades de consulta e análise estatística dos valores publicados.

#### 2.7. Disponibilidade de dados

No que toca aos processos de análise de dados, é importante ter o conhecimento da fiabilidade e da exatidão das plataformas que recolhem ativamente dados. É importante não só de uma perspetiva estatística, mas também de uma perspetiva de manutenção, com o intuito de perceber o desempenho dos dispositivos e se estão a funcionar corretamente.

A plataforma web disponibiliza um módulo de visualização da disponibilidade dos dados, determinado de forma automática pela análise das séries temporais armazenadas. Mostra um panorama geral da disponibilidade das observações e marca o seu estado com uma cor que caracteriza a qualidade das mesmas.

Os dados são apresentados na forma de múltiplas linhas temporais, com uma navegação no eixo do tempo, tal como o representado na Fig. 3.

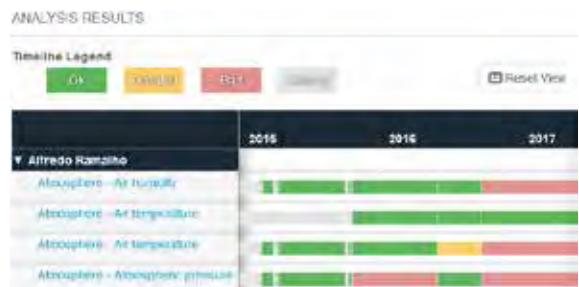


Fig. 3. Linhas temporais que representam a qualidade e a disponibilidade das observações

#### 2.8. Extração de Indicadores

A extração de indicadores estatísticos é fundamental para a realização de estudos da evolução dos parâmetros. Através deste conhecimento, é possível prever, planear e agir de acordo com a situação em causa.

A plataforma permitirá a extração de diferentes tipos de indicadores de forma automática e a publicação de outros cujo cálculo necessite de uma intervenção humana, contribuindo para a consolidação de uma base de conhecimento capaz de melhorar as condições de estudo da evolução costeira.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de uma infraestrutura de observação costeira implica um esforço de melhoria contínua, não apenas pelo suporte de novas fontes de dados de observação, mas também de mecanismos que facilitem a extração de novos indicadores, contribuindo para a sistematização de procedimentos.

O MarRISK pretende contribuir para a acessibilidade a ferramentas adequadas para a avaliação e estudo dos riscos costeiros. Esta informação é crucial para avaliar recorrentemente o estado dos sistemas costeiros, e dinamiza os processos de tomada de decisões e planeamento de estratégias de defesa para a adaptação às alterações do meio ambiente.

A infraestrutura engloba um vasto número de normas e tecnologias, que têm como objetivo suportar a diversidade dos dados a partilhar por parceiros ou cidadãos, disponibilizando-os de forma consistente e inteligível, para os mais variados fins.

### REFERÊNCIAS

- Diário da República nº 174/2009. (2009) Resolução do Conselho de Ministros 82/2009, de 8 de Setembro.
- S. Filipe, L. António, M. Gabriela, R. Laudemira, T. Rui. (2014). *Gestão da Zona Costeira o Desafio da Mudança*.
- INSPIRE (2016). INSPIRE Maintenance and Implementation Group. Technical Guidance for INSPIRE Spatial Data Services and services allowing spatial data services to be invoked, version 4.0, Disponível em <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/sds> [Acedido em 18 de Maio de 2016].
- Open Geospatial Consortium. (2012). Sensor Observation Service Interface Standard, OGC 12-006, Disponível em [https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=47599\\_published\\_on\\_2012-04-20](https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=47599_published_on_2012-04-20) [Acedido em 18 de Maio de 2018].
- Open Geospatial Consortium. (2016). OGC SensorThings API Part 1: Sensing [online] Disponível em <http://docs.opengeospatial.org/is/15-078r6/15-078r6.html> [Acedido em 18 de Maio de 2018].
- Unidata. (2018). Unidata, THREDDS Data Server version 4.6.11, [online] Disponível em <http://doi.org/10.5065/D6N014KG>, [Acedido em 18 de Maio de 2018].
- H. Gaston. (2017). *MQTT Essentials – A lightweight IoT Protocol*. Packt Publishing.
- Sun, L., He, D. Zhao, P. (2015). A Research of Publishing Map Technique Based on Geoserver. *Asian Journal of Applied Sciences*, Volume 8 (3): 185-195, 2015.



## Sistema geoespacial para planeamento e apoio à decisão na navegação em águas restritas

A. Ferreira (1), A. Morgado (2), P. Nunes (2), A. Correia (1)

(1) CINAV, Alfeite. chanoca.ferreira@marinha.pt

(2) Instituto Hidrográfico, Lisboa.

**Resumo:** Os portos são uma infraestrutura fundamental para a economia do país, constituindo geralmente um canal preferencial, através do qual um significativo volume de bens e serviços são importados e ou exportados. É fundamental por isso, salvaguardar a ocorrência de acidentes nas águas portuárias e respetivos canais de acesso, tendo para esse efeito especial relevância as iniciativas de prevenção levadas a cabo pelas autoridades responsáveis pela navegação marítima e, em particular, pela gestão portuária. São inúmeros os fatores estáticos e dinâmicos que condicionam a navegação em águas restritas e que devem ser constantemente monitorizados durante a rota no porto e respetivos canais de acesso.

Nesse âmbito, o presente artigo descreve a conceção, desenho e implementação de um sistema geoespacial de apoio à decisão para planeamento da navegação em águas restritas.

**Palavras-chave:** Sistemas de apoio à decisão, Sistemas de informação geográfica, navegação em águas restritas, segurança marítima.

### 1. INTRODUÇÃO

Os inúmeros navios que demandam os portos, tornam elevados os riscos de colisão e encalhe nos canais de navegação. A ocorrência de um evento desta natureza numa zona portuária, pode ter impactos económicos e ambientais muito negativos para o estado costeiro.

De acordo com um relatório da seguradora Allianz, no ano de 2015 registou-se a perda de 85 navios em todo o mundo (Allianz, 2015). Trata-se de um valor significativo tendo em conta os esforços da IMO no desenvolvimento de regulamentação da atividade dos navios e pelo fato destes navegarem atualmente com sistemas de posicionamento por satélite e sistemas eletrónicos de apoio à navegação (ECDIS, AIS e RADAR, etc.).

Uma prevenção eficaz dos acidentes em zonas portuárias impõe a adoção de medidas que minimizem os riscos. O *risco* é uma função da probabilidade e a severidade dos efeitos da ocorrência do evento. Assim, a sua redução pode ser conseguida através de ações que reduzam a probabilidade de ocorrência do evento e/ou medidas de contingência para lidar com as consequências do evento. As ações para reduzir a probabilidade podem ser adotadas a dois níveis: (1) ao nível das instituições nacionais e administrações portuárias, e.g. regulamentação específica e estudos de identificação das zonas de maior risco que permitam desencadear ações adaptadas à redução do risco e melhoria da sinalização; e (2) ao nível dos capitães dos navios e navegantes na adoção de práticas mais cautelosas e seguras na condução da navegação.

O sistema apresentado neste artigo tem por objetivo constituir-se numa ferramenta de apoio à decisão dos

navegadores auxiliando-os a antecipar zonas de navegação em águas restritas com maior probabilidade de ocorrência de um acidente associado a *fatores estáticos* (e.g. distância livre da quilha do navio ao fundo e largura disponível no canal de navegação) e *fatores dinâmicos* com influência na manobra (e.g. correntes, maré e meteorologia). A identificação das posições do percurso do navio em que é necessária uma manobra mais cuidadosa ajuda a clarificar o panorama da navegação e constitui uma informação valiosa para o navegador, suscetível de reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes.

O objetivo deste trabalho é sintetizar a pesquisa efetuada, no contexto de um projeto em curso, que visa a conceção e implementação de um sistema capaz de auxiliar a tomada de decisão durante navegação nas águas restritas de portos, mitigando deste modo, o potencial risco de acidente marítimo.

O presente artigo está organizado em cinco seções. Na Introdução foi efetuado o enquadramento do tema do risco no contexto da segurança da navegação e condução da navegação. Na seção 2, serão elencados os fatores que determinam a segurança da navegação, bem como os fatores que permitem categorizar o risco dos diferentes setores do canal navegável. A seção 3 descreve o modelo do sistema que se pretende implementar para apoio à decisão do navegador em águas restritas. A seção 4 apresenta os resultados obtidos bem como o esboço da interface gráfica da aplicação a ser construída. O artigo finaliza com a apresentação das conclusões e trabalho futuro.

## 2. SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO E RISCO

A definição de risco não é consensual, dependendo muitas vezes do contexto em que o termo é aplicado. A norma ISO31000:2018, define risco como o “efeito da incerteza sobre os objetos”, podendo a alteração esperada ser considerada positiva ou negativa e por isso criar oportunidades e/ou ameaças. O risco é geralmente expresso em termos da fonte de risco, de eventos potenciais, das suas consequências e do seu grau de probabilidade (ISO, 2018). Sendo a probabilidade o grau de possibilidade do acontecimento ter lugar e estando as consequências relacionadas com a intensidade da ocorrência do evento (UNE, 2014), é comum formular o risco nos termos da seguinte expressão analítica:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequências}$$

A *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA), a organização internacional responsável pela uniformização das ajudas à navegação, (Nacional, 2018), sistematiza o processo da gestão do risco nas seguintes etapas:

- Identificação do perigo
- Avaliação dos riscos
- Especificação das opções de controlo do risco
- Tomada da decisão
- Execução da ação

No contexto do presente trabalho apenas as duas primeiras etapas são consideradas, pois é no seu âmbito que se realiza a análise dos fatores de risco (vide Tabela I), materializada em mapas de risco que irão permitir ao navegador uma panorâmica do grau de perigosidade dos diferentes setores do canal navegável.

Tabela I. Fatores de risco na navegação marítima (Adaptado de 1018 Risk Management).

Condições de tempo e de mar	Estado do tráfego	Condições de navegação	Configurações do canal	Distorções e avarias físicas	Distorções e avarias humanas
Visibilidade das nuvens	Tráfego (ALM)	Navegação eletrônica	Profundidade	Avarias físicas	Erros de manobra de segurança e estabilidade
Comportamento da corrente	Previsão de tráfego	Estado do mar	Largura do canal de navegação	Distorções de contornos	Erros de manobra de segurança e estabilidade
Tipo de fundo	Intensidade do tráfego - velocidade e de passagem	Condições do vento	Obstruções e verticalidade	Distorções de profundidade	Erros de manobra de segurança e estabilidade
Distorções de fundo	Distorções de fundo	Distorções de fundo	Comportamento do canal de navegação	Distorções de profundidade	Erros de manobra de segurança e estabilidade
Referências de largura	Intensidade do tráfego - velocidade	Referências de largura	Fundo do canal	Obstruções de fundo	Erros de manobra de segurança e estabilidade
	Sede	Fundo do canal	Fundo do canal	Obstruções de fundo	Erros de manobra de segurança e estabilidade
	Obstruções	Obstruções	Obstruções	Obstruções	Erros de manobra de segurança e estabilidade

Nas seções seguintes, são discutidos os fatores de risco no canal de navegação, definidos pela IALA, considerados mais relevantes na conceção do sistema de apoio à decisão na navegação marítima em águas restritas. Serão abordados no presente estudo os seguintes fatores: navegação diurna/noturna, condições de vento, correntes, profundidade e largura do canal.

### 2.1. Vento

O vento incide sobre as obras mortas e superestruturas do navio uma pressão que pode influenciar o trajeto. A ação do vento faz-se sentir tanto mais quanto maiores forem as superfícies expostas, sendo o efeito proporcional ao quadrado da sua velocidade relativa. De entre os efeitos causados pelo vento destacam-se os seguintes (Navio, 2000): o adornamento; a redução no seguimento; a dificuldades no governo; e a surriada.

### 2.2. Corrente

As correntes são movimentos de massas de água que podem atingir velocidades significativas especialmente em estuários e canais, podendo mesmo atingir mais de 8 nós. A corrente quando tem uma velocidade elevada pode causar variações no seguimento, acelerando ou abrandando o navio. A corrente pode igualmente ter um efeito negativo no governo do navio, devido às diferenças de movimento relativo entre este e a água (Navio, 2000).

### 2.3. Profundidade

A profundidade é um dos fatores cruciais para uma navegação segura. É, portanto, necessário, durante a navegação, uma constante atualização da informação sobre a batimetria.

Durante a condução da navegação em águas restritas ocorrem por vezes mudanças significativas de profundidade, sendo por isso da máxima importância o estudo deste parâmetro na conceção do presente sistema.

Segundo a *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure* (PIANC), a determinação da profundidade necessária para o navio navegar em segurança é função de diversos componentes, tais como: o nível da água, o fundo do canal e as características do navio. Outro dos fatores que influencia a distância da quilha ao fundo é a ondulação, que pode provocar movimentos verticais no navio, bem como a variação da densidade da água (vide Fig. 1).



Fig. 1. Fatores relevantes para a batimetria (Fonte: PIANC, 2014).

### 3. MODELO DO SISTEMA

Na conceção do sistema de apoio à decisão foi dada relevância à modelação das condições de navegação e à configuração do canal de navegação.

No que respeita às condições de navegação, estas foram consideradas função das variáveis dinâmicas corrente e vento. As condições de navegação foram pois, determinadas tendo em conta o ângulo que a direção do vento e a corrente formam com a proa do navio. Esta relação varia durante o trajeto, devido à variação da área de aplicação de força no navio, bem como da influência dessa força no movimento.

A determinação do efeito da corrente e do vento sobre o navio foi efetuada através do cálculo da força ( $F$ ) produzida utilizando a seguinte equação (Jacinto, 2014; Owens e Palo, 1982):

$$F = \frac{1}{2} c \rho v^2 A$$

*Sendo:  $c$  – coeficiente de forma;  $\rho$  – massa específica do fluido  $\text{Kg/m}^3$ ;  $v$  – velocidade do fluido em  $\text{m/s}$ ;  $A$  – projeção da área no plano perpendicular ao qual o fluido exerce pressão  $\text{m}^2$*

Deste modo, decompondo a força que incide sobre o navio será possível determinar o efeito longitudinal e transversal nos movimentos deste e assim corrigir antecipadamente o seu efeito.

O modelo batimétrico utilizou como fonte de dados sondas reduzidas dos portos. No caso do porto de Lisboa, usado como caso de estudo, as sondas foram cedidas pelo Instituto Hidrográfico (IH) no formato XYZ ETRS89/PTTM06. As sondas foram importadas para QGIS e foi realizada a sua interpolação por forma a obter uma superfície contínua na área de estudo. A superfície foi classificada em função de intervalos de profundidade de acordo com o calado do navio e o pé de piloto. Esta classificação permitiu identificar zonas cuja profundidade disponível garante uma navegação segura do navio e paralelamente permite determinar de forma automática uma aproximação das células da superfície que correspondem à linha limite de águas navegáveis.

A consolidação dos efeitos dos diferentes fatores de risco está representada no diagrama de processos da Fig. 2. O resultado final desse processamento são os mapas de risco, instrumento que sintetiza ao navegador o grau de risco determinado para diferentes setores do canal navegável. A Fig. 3 representa um mapa de risco do canal navegável do porto de Lisboa, com uma maré de 1,7 m, com o navio sem caimento, para o caso específico de um navio com calado de 6,7m e utilizando um pé de piloto de 1,5m.

A implementação do modelo descrito irá ser efetuado sobre o sistema de informação geográfica

QGIS. Trata-se de um sistema de fonte aberta que disponibiliza uma interface de programação para a linguagem *python*. Pretende-se com a utilização desta linguagem a obtenção de uma aplicação independente da interface gráfica do QGIS, que realize apenas as operações específicas relacionadas com a segurança marítima em águas restritas, e, por isso, seja mais fácil de operar por utilizadores não familiarizados com sistemas de informação geográfica (QGIS, 2018).

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A operação do sistema de apoio à decisão é iniciada com a disponibilização do mapa de um porto selecionado pelo utilizador. A esse mapa, é em seguida adicionada a batimetria, com um sistema de cores, por forma a auxiliar o navegador na escolha da trajetória ideal no canal navegável durante a fase de planeamento do percurso (ver Fig. 3).

Após o início do percurso de navegação são fornecidos ao sistema os fatores de risco específicos do navio e de cada posição da trajetória. Estes dados irão permitir a atualização em tempo real dos mapas de risco, suporte fundamental na tomada de decisão. De notar, porém, que os fatores dinâmicos inseridos no sistema têm por base previsões, assim como, os dados batimétricos são baseados em interpolações, do que pode naturalmente resultar desvios relativamente aos dados reais. Uma forma de validar e reduzir a margem de erro é o recurso aos sensores de bordo, nomeadamente a sonda e o anemómetro.

Outro aspeto relevante na implementação do sistema é a necessidade de testes que permitam validar a fiabilidade e usabilidade do sistema. Dessa forma poder-se-á garantir a adequabilidade do sistema para as tarefas de planeamento e monitorização do trajeto no canal navegável.

### 5. CONCLUSÕES

O presente artigo descreve um trabalho em curso, que usa fatores estáticos e dinâmicos considerados revelantes para a segurança marítima em canais de navegação. Os referidos fatores são sintetizados em mapas de risco, resultado a ser produzido por um sistema de apoio à decisão implementado tendo por base a interface de programação disponibilizada pelo sistema de informação geográfico QGIS. Uma posterior fase de testes do sistema, permitirá avaliar a adequabilidade do sistema para o propósito da segurança marítima, face aos fatores estáticos e dinâmicos considerados, bem como à plataforma de base QGIS usada como infraestrutura.



Fig. 2. Processamento de informação no Sistema de apoio à decisão

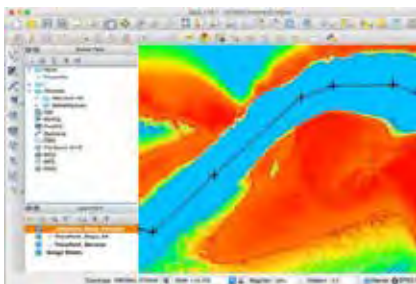


Fig. 3. Protótipo do sistema de apoio à decisão.

### Agradecimentos

Ao Instituto Hidrográfico e CINAV pelo suporte prestado na realização do presente estudo.

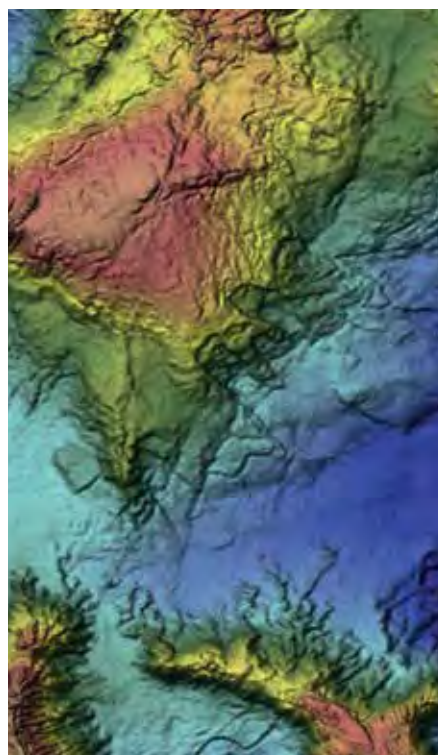
### REFERÊNCIAS

- Allianz. (2015). Safety and Shipping Review 2015, (December 2014), 36–36.
- PIANC. (2014). Report n° 121 - 2014 Harbour Approach Channels Design Guidelines (No. 9782872232109).
- ISO. (2018). Risk management - Guidelines (pp. 16–16).
- UNE, N. (2014). Norma UNE 150008:2008 Análisis y evaluación del riesgo ambiental, 46.
- Owens, R., Palo, P. (1982). Wind-Induced Steady Loads on Ships.: Fort Belvoir, VA. <https://doi.org/10.21236/ADA119984>
- Jacinto, L. (2014). Ação do vento: quantificação de acordo com o EC, 41.
- Nacional, A. M. (2018, março 14). Obtido de <http://www.amn.pt/DF/Paginas/IALA.aspx>
- Navio, A. M. D. (2000). MDN, Marinha, 244.
- QGIS (2018), <https://www.qgis.com>, acessado em Jan 2018.



# TECNOLOGIAS DO MAR E ENGENHARIA OCEANOGRÁFICA

## 5<sup>as</sup>. JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA





## Análise das forças num emissário submarino utilizando um modelo numérico 3D RANS-VoF

E. Didier (1), M.G. Neves (1) e P.R.F. Teixeira (2)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 101 Av. do Brasil, 1700-066 Lisboa, Portugal. edidier@lnec.pt

(2) Universidade Federal de Rio Grande, Escola de Engenharia, Av. Itália, km 8, Campus Carreiros, 96203-900 Rio grande, RS, Brasil.

**Resumo:** O conhecimento das forças devido à acção das ondas que atuam nos emissários submarinos, compostos por uma conduta e anéis de estabilização de betão, para agitação com direcção de propagação próxima da direcção do emissário, é essencial para o seu dimensionamento. Esta é uma configuração complexa, para a qual a modelação numérica, utilizando modelos 3D de tipo RANS-VoF (*Reynolds-Average-Navier-Stokes Volume-of-Fluid*), é especialmente adequada para obter uma estimativa das forças na conduta e nos anéis. O presente estudo consiste na simulação de um emissário submarino com anéis de estabilização à escala 1:15 que foi ensaiado num tanque de ondas tridimensional, nas instalações do *Danish Hydraulics Institute*, para estudar a influência da direcção da agitação incidente e da distância da conduta ao fundo nas forças que atuam no emissário. Os resultados numéricos são comparados aos experimentais: obtém-se uma boa concordância nas forças de arrasto, mas as forças de sustentação são subestimadas numericamente.

**Palavras-chave:** emissários submarinos, forças, RANS-VoF, tanque de ondas numérico.

### 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das forças que atuam nos emissários submarinos devido à acção das ondas é essencial para o seu correcto dimensionamento. Actualmente, embora muitos dos emissários sejam compostos por conduta e anéis de estabilização de betão (Figura 1), o cálculo das forças para o dimensionamento é feito com base em coeficientes deduzidos para o caso de condutas cilíndricas sem anéis. Mais ainda, o conhecimento da resposta da conduta para o caso de agitação com direcção de propagação próxima da direcção do emissário é muito precário já que na bibliografia existente, os valores das forças de referência para o projecto são obtidos com base em resultados de ensaios em modelo físico bidimensionais a escala reduzida, i.e., com agitação perpendicular à conduta.

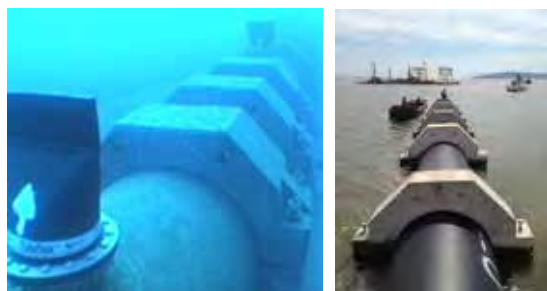


Fig. 1. Emissários submarinos: Conduta e anéis.

Em 2013 realizou-se uma campanha de ensaios experimentais nas instalações do *Danish Hydraulics Institute* (DHI) para contribuir para o conhecimento das forças em emissários submarinos com anéis,

sendo o emissário submarino ensaiado simulado através de uma conduta de secção circular. Foram realizados ensaios com e sem anéis, para diferentes condições de agitação e direcções de agitação incidente (90°, i.e., perpendicular à conduta, 30° e 10°) e para três distâncias da conduta ao fundo (Neves *et al.*, 2013, 2014).

Nesta comunicação modela-se a interacção entre uma onda incidente regular e um emissário submarino, composto pela conduta e os anéis de estabilização, utilizando um tanque de ondas numérico baseado nas equações da dinâmica dos fluidos RANS-VoF 3D (*Reynolds-Average-Navier-Stokes Volume-of-Fluid*). As forças atuantes no emissário são comparadas às obtidas nos ensaios realizados no tanque de ondas do DHI.

### 2. TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO

O modelo numérico RANS-VoF FLUENT®, versão 6.3.26, (Fluent, 2006), é utilizado para desenvolver o tanque numérico de ondas 3D. É aplicada uma técnica de volumes finitos para resolver as equações RANS e VoF (Hirt e Nichols, 1981; Perić e Ferziger, 1997), sendo as variáveis definidas no centro dos elementos da malha. Os dois fluidos, ar e água, são incompressíveis.

A integração no tempo é efectuada com uma formulação implícita e uma discretização no tempo de segunda ordem. Os termos viscosos são discretizados por um esquema de diferenças centradas de segunda ordem. Os termos convectivos são determinados pelo esquema MUSCL, de terceira ordem, e UPWIND de segunda ordem para as



equações de conservação de quantidade de movimento e as equações do modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ , respetivamente. A pressão é determinada pelo esquema PRESTO!, classicamente utilizado para modelação de propagação de onda no FLUENT® (Fluent, 2006), que integra o efeito da aceleração da gravidade. O modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ , com os coeficientes padrões, é o utilizado, pois permite propagar com precisão as ondas tomando em conta os principais efeitos e fenómenos devido ao escoamento turbulento. O algoritmo SIMPLER, acoplado velocidade e pressão, é o utilizado. Os coeficientes de sub-relaxação são iguais a 1 para a quantidade de movimento e o VoF e 0.8 para o modelo  $k-\varepsilon$ . No método VoF, a fracção de volume é determinada pelo esquema HRIC (High Resolution Interface Capturing, Perić e Ferziger, 1997). O passo de tempo para as simulações é da ordem de  $T/600$ , sendo  $T$  o período da onda, e são realizadas 6 iterações não-lineares para reduzir os resíduos de pelo menos 3 ordens de grandeza, o que é suficiente para propagar as ondas com precisão (Teixeira *et al.*, 2013).

O tanque de ondas é definido através da imposição das condições limites seguintes:

- No topo do tanque é imposta a pressão atmosférica;
- Um batedor estático permite gerar as ondas na entrada do tanque de ondas através do perfil das componentes da velocidade horizontal (normal ao batedor) e vertical e da posição da superfície livre. O batedor integra uma técnica de absorção activa das ondas, caso haja ondas refletidas que chegam ao batedor. Devido à possibilidade de reflexão e difração e à conseqüente aparição de ondas tridimensionais, é imprescindível recorrer a uma técnica de batedores múltiplos (do tipo *snake*) que integram uma correção da obliquidade das ondas caso apresentem uma direção oblíqua relativamente à direção normal ao plano do batedor (Higuera *et al.*, 2013; Didier *et al.*, 2016; Teixeira *et al.*, 2017);
- Nas paredes e no fundo do tanque de ondas é imposta uma condição de aderência;
- No final do tanque de ondas é aplicada a técnica de absorção dinâmica que permite evitar a reflexão das ondas para o interior do tanque. É utilizado um batedor múltiplo integrando uma correção da obliquidade das ondas, o que permite um melhor desempenho da absorção activa no final do tanque;
- Nas fronteiras laterais do tanque de ondas é imposta uma condição de deslizamento/simetria.

As condições iniciais são de água parada, com campo de velocidades nulo, e de pressão hidrostática.

### 3. MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO EMISSÁRIO SUBMARINO

O emissário submarino ensaiado no tanque de ondas tridimensional no DHI, com 35m de comprimento, 25m de largura e 0.8m de profundidade, a escala 1:15, é composto por uma conduta circular com um

diâmetro de 0.07m e um comprimento de aproximadamente 10.0m, estando 26 anéis colocados com uma distância fixa entre eles de 0.33m. A profundidade no tanque é constante e igual a 0.7m. Nos ensaios o emissário submarino foi simulado através da conduta, sem e com anéis (de 2 tipos), incluiu diferentes condições de agitação e direções de agitação incidente ( $90^\circ$ , i.e., perpendicular à conduta,  $30^\circ$  e  $10^\circ$ ) e três distâncias da conduta ao fundo, incluindo a conduta apoiada no fundo, com o objectivo de definir as forças actuante na estrutura (Neves *et al.*, 2013, 2014).

Considera-se, na presente aplicação numérica, uma onda incidente regular com altura,  $H$ , de 0.15m e período,  $T$ , de 2.07s. O emissário é composto por anéis e a conduta posicionada a uma distância ao fundo de 0.033m. O modelo do emissário no tanque numérico tem, assim, as mesmas características geométricas que o modelo utilizado no tanque do DHI (Figura 2). A Figura 3 apresenta o anel utilizado e as suas dimensões.

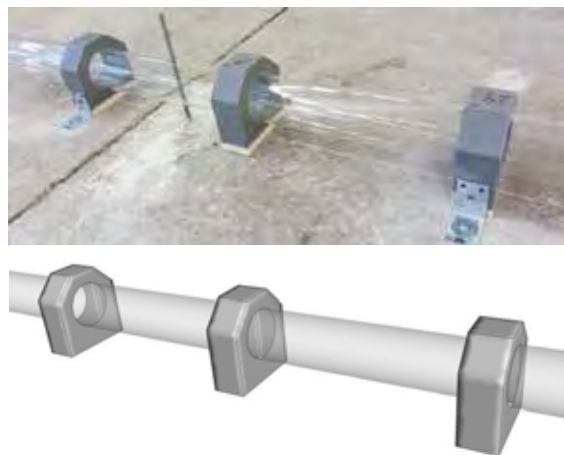


Fig. 2. Modelo do emissário no tanque de ondas físico e no tanque de ondas numérico composto da conduta e dos anéis.

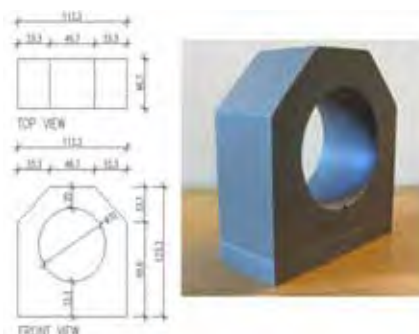


Fig. 3. Geometria do anel (dimensões são em mm).

As forças foram medidas com dois sensores de força (Figura 4) colocados de cada lado dum troço de emissário de 0.70m de comprimento, composto por dois blocos com as secções de conduta correspondentes, que medem o deslocamento relativo deste conjunto em relação aos troços adjacentes fixos ao fundo. Por este motivo, os dois blocos deste troço estão ligeiramente acima do fundo do tanque, a uma distância à volta de 3mm. As

forças são compostas da força de arrasto, horizontal, no sentido da propagação das ondas,  $F_D$ , e da força de sustentação, vertical,  $F_L$ . As amplitudes destas forças foram estimadas como a metade da soma dos módulos das amplitudes máximas (máximo positivo e máximo negativo).



Fig. 4. Sensor de força e troço de emissário de medição.

Numericamente, para obter a força vertical nos anéis, é necessário, tal como no caso experimental, posicionar os anéis um pouco acima do fundo, resultando numa camada fluida fina de pequena espessura, 3mm, que implica ter alguns cuidados na elaboração da malha nesta zona (Figura 5).

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Verificou-se primeiramente a independência numérica dos resultados com o número de elementos da malha, particularmente na camada fluida fina. A direcção da agitação incidente é de  $90^\circ$  o que resulta, aproveitando os planos de simetria da estrutura, num tanque de ondas de 0.33m de largura, que corresponde a um anel e duas meias condutas, e de 9.7m de comprimento (Figura 5). As extremidades do tanque de ondas são equipadas com um batedor para geração e absorção activa das ondas.

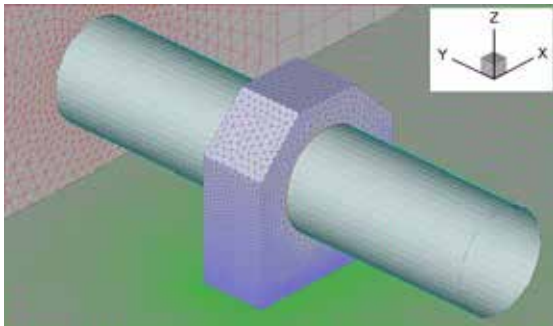


Fig. 5. Malha na conduta e no anel, no fundo e no plano de simetria.

A Figura 6 apresenta a força  $F_D$  e  $F_L$  no troço de emissário de medição, respectivamente, para 4 resoluções na camada fluida fina por baixo do anel: 1 (mesh1), 2 (mesh2), 3 (mesh3) e 5 (mesh5) camadas de elementos prismáticos, com uma dimensão de elementos variando de 3.0 a 0.6mm e um número de elementos da malha entre 131830 e 279600. A dependência dos resultados com o refinamento da malha na camada fluida fina não é muito significativa, quer na forma geral da variação das forças quer nas amplitudes. Por isso, optou-se por se considerar apenas 2 camadas de elementos, a

malha tendo, assim, um número de elementos razoável nos casos de incidência oblíqua das ondas de  $10^\circ$  e  $30^\circ$ , que necessitam de um tanque de ondas de maior largura. As amplitudes das forças obtidas numericamente são  $F_D=510g$  e  $F_L=86g$ . No modelo físico, as amplitudes das forças obtidas são de 436 e 316g, respectivamente. A diferença entre os valores da força de arrasto é de 15.0%, o que é bastante razoável, mas aumenta para 73.0% quando se compara a força de sustentação.

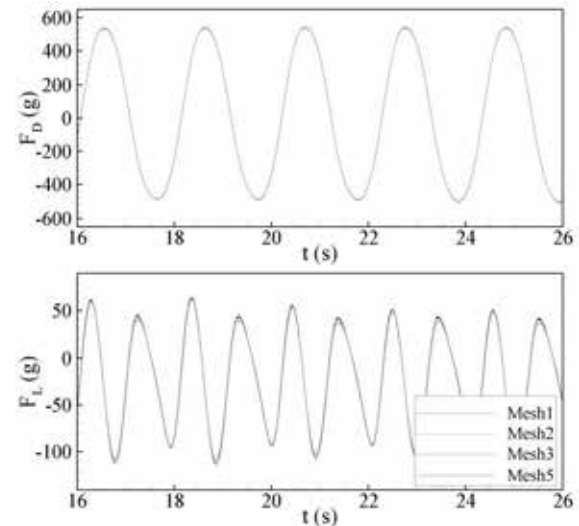


Fig. 6. Força  $F_D$  e  $F_L$  no troço de emissário para as 4 malhas.

Simulou-se, com as considerações anteriores relativas ao refinamento da malha, a interação entre uma onda com uma direcção de agitação incidente de  $30^\circ$  e o emissário. O emissário, no tanque de ondas numérico, tem um comprimento de 3.20m, e é composto por duas partes sem anéis, em cada uma das duas extremidades do troço de emissário considerado, e uma parte central constituída pela conduta e por 7 anéis, com um comprimento total de 2.02m, dimensão estimada suficiente para reproduzir os fenómenos observados em modelo físico (Figura 7). As extremidades do tanque de ondas são equipadas com um batedor múltiplo de 10 pás individuais para geração e absorção activa das ondas.

Apresentam-se, na Figura 8, as séries temporais das forças  $F_D$  e  $F_L$  no troço de emissário de medição. Verifica-se, como observado nos ensaios em modelo físico, que a força de arrasto apresenta um período igual ao da onda incidente e que a força de sustentação tem metade deste período. As amplitudes positivas e negativas da força de arrasto são relativamente similares e a variação da força apresenta uma forma geral relativamente sinusoidal. As amplitudes da força de sustentação são muito diferentes, as amplitudes negativas sendo 3.6 vezes maiores que as amplitudes positivas. As amplitudes de  $F_D$  e  $F_L$  determinadas numericamente são de 251 e 35g, respectivamente, e as obtidas nos ensaios em modelo físico são de 237 e 46g, respectivamente. A amplitude de  $F_D$  determinada numericamente é bem

estimada, sendo a diferença entre o valor numérico e o experimental de apenas 5.6%. A amplitude de  $F_L$  é, no entanto, subestimada, sendo a diferença entre o valor numérico e o experimental de 31.4%. A força de sustentação apresenta uma frequência dupla quando comparada com a força de arrasto devido à formação alternativa de vórtices, principalmente ao redor da conduta, a dissimetria da força de sustentação sendo devida à presença do fundo.

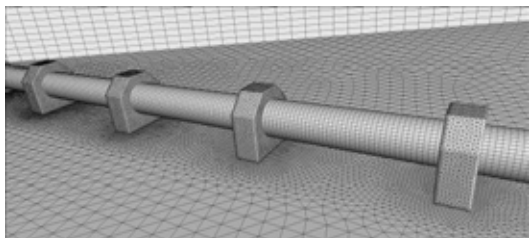


Fig. 7. Malha do emissário e do fundo para incidência de 30°.

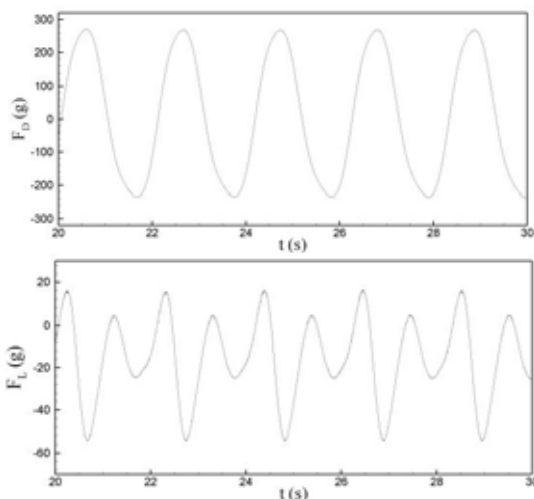


Fig. 8. Séries temporais das forças  $F_D$  e  $F_L$  no troço do emissário para agitação incidente de 30°.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foi apresentado um tanque de ondas numérico 3D, baseado nas equações URANS-VoF, que permite modelar a interação entre uma onda e um emissário submarino. Considerando a direções de agitação incidente de 90 e 30°, uma altura de onda de 0.15m e um período de 2.07s, verificou-se que a amplitude da força de arrasto é bem estimada, com uma diferença entre força obtida numericamente e experimentalmente de 15.0 e 5.6%, respetivamente. No entanto, a amplitude da força de sustentação calculada numericamente é fortemente subestimada, com uma diferença de 73.0 e 31.4%, respetivamente. O modelo de turbulência  $k-\epsilon$  parece ser a razão destas discrepâncias, já que é um modelo relativamente simples, particularmente no que diz respeito à modelação do escoamento complexo em torno de um cilindro de secção circular e à estimação da força de sustentação, mais sensível à distribuição de pressão em torno de uma conduta de secção circular que a força de arrasto. No entanto, este modelo de turbulência permite modelar a

propagação das ondas sem dissipação. Outras configurações, alterações da malha na conduta circular e outros modelos de turbulência vão ser analisados para aferir e, eventualmente, melhorar estes resultados preliminares.

### Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento concedido no projecto SFRH/BPD/97343/2013.

### REFERÊNCIAS

- Didier, E., Teixeira, P.R.F. e Neves M.G. (2016). Tanque de ondas numérico 3D para estudos de engenharia costeira. *Actas VII SEMENGO 2016 – VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, Rio Grande, RS, Brasil.
- Fluent 6.3, 2006, User's Guide, Fluent Inc, USA.
- Higuera, P., Lara, J.L. e Losada, I.J. (2013) Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models applications to OpenFoam®. *Coastal Engineering*, 71, 102-118.
- Hirt, C.W. e Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Neves, M.G., Figueira, P., Afonso, M.C., Mendonça, A., Solis, M.V., Didier, E., Reis, M.T., Clavero, M., Ortega-Sánchez, M. e Losada, M.A. (2013). Estudo experimental de forças sobre um emissário submarino: influência da direcção da agitação incidente, da presença dos anéis de estabilização e da distância da conduta ao fundo. *Actas 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuaria*, Lisboa, Portugal.
- Neves, M.G., Mendonça, A., Didier, E., Reis, M.T., Inverno, J., Figueira, P., Afonso, M.C., Vílchez, M., Clavero, M., Ortega-Sánchez, M. e Losada, M.A. (2014). Experimental study of forces on a submarine outfall: Influence of incident wave direction of stabilizing concrete weights and pipe distance from the bottom. *Actas HYDRALAB IV Joint User Meeting*, Lisbon, Portugal.
- Peric, M. e Ferziger, J.H. (1997). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Second edition, Springer.
- Teixeira, P.R.F., Davyt, D.P., Didier, E., e Ramalhais, R. (2013). Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier Stokes equations. *Energy*, 61(1), 513–530.
- Teixeira, P.R.F., Didier, E. e Neves, M.G. (2017). A 3D RANS-VOF wave tank for oscillation water column device studies. *Actas VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017*, Nantes, France, 710-720.

# Caraterização geotécnica para roteamento de cabos. Caso de estudo: cabo elétrico entre as ilhas da Madeira e de Porto Santo

J. Pombo (1), A. Rodrigues (1) e N. Lapa (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Joaquim.pombo@hidrografico.pt

**Resumo:** O roteamento de cabos elétricos submarinos apresentam diversos riscos, principalmente os associados às incertezas sobre as condições de estabilidade dos solos marinhos onde as estruturas serão instaladas, nem sempre descritas com a caraterização da estrutura da camada sedimentar marinha, realizada pelos métodos clássicos.

Por forma a mitigar os riscos associados a estes projetos é necessário realizar uma caraterização geotécnica dos solos marinhos. O presente trabalho apresenta a caraterização geotécnica realizada para suportar o projeto de dimensionamento e instalação de um cabo elétrico submarino entre a ilha da Madeira e a ilha do Porto Santo.

**Palavras-chave:** caraterização geotécnica, solos marinhos, ensaios triaxiais.

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A rede de cabos submarinos para telecomunicações ou transporte de energia elétrica produzida em *offshore* tem vindo a crescer, impulsionada pelo aumento das telecomunicações e pela aposta na produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis localizadas em *offshore*.

O roteamento de cabos é um exercício para encontrar a rota mais curta entre os dois locais de ligação (ICOL, 2012), ou seja, no caso da energia elétrica, entre o local de produção em *offshore* e a subestação instalada em terra, tendo em conta as restrições impostas pelas limitações de engenharia, físicas, ambientais e de uso por terceiros.

Para garantir o sucesso económico destes projetos é necessário conhecer as propriedades dos fundos marinhos e, em particular as geotécnicas. Só desta forma será possível adotar medidas de contenção de riscos que coloquem em causa a integridade da infraestrutura, nomeadamente os movimentos e deslizamentos submarinos, o enterramento excessivo do cabo ou a necessidade de proteção do mesmo devido à presença de zonas rochosas que danifiquem a sua armadura.

No presente artigo, apresenta-se o caso de estudo realizado para roteamento de um cabo elétrico entre as ilhas da Madeira e do Porto Santo (Fig. 1).

## 2. MÉTODOS

A campanha de prospeção para amostragem dos solos marinhos, ao longo do traçado previsto para o cabo elétrico, foi realizada a bordo do navio oceanográfico NRP “Almirante Gago Coutinho”, tendo-se colhido 48 amostras superficiais com um colhedor Smith-McIntyre e 18 amostras verticais com um *corer* de gravidade.

Os ensaios laboratoriais de caraterização física e mecânica dos solos amostrados foram realizados no laboratório do Instituto Hidrográfico. Foram realizados, em primeiro lugar, os ensaios não destrutivos (susceptibilidade magnética e ondas *P*) e, posteriormente, os ensaios destrutivos (análise granulométrica, teor em carbonatos, densidade aparente e de partículas, teor em água e ensaios triaxiais UU) seguindo normas e procedimentos internacionais.

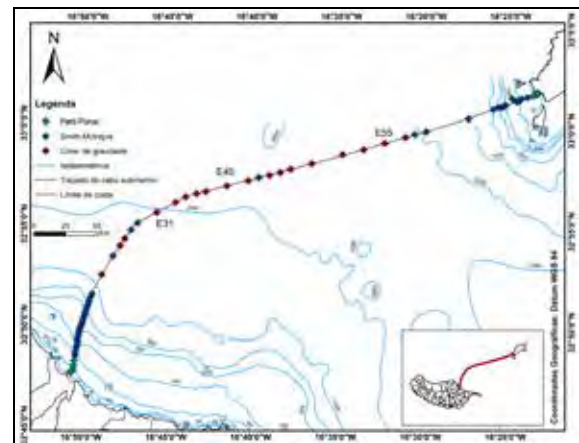


Fig. 1. Área de estudo e localização da amostragem.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caraterização dos solos superficiais

De acordo com a classificação de Shepard (1954) os solos marinhos colhidos ao longo do traçado do cabo elétrico pertencem a 5 classes texturais distintas: areia, areia siltosa, silte arenoso e argiloso e areia, silte e argila (Fig. 2).

Com base na distribuição destas classes, considera-se que, de uma forma geral, ambas as plataformas insulares são maioritariamente compostas por solos

arenosos, com mais de 80% de areia. Esta fração diminui de frequência com o aumento da profundidade e distância à linha de costa (Fig. 3).

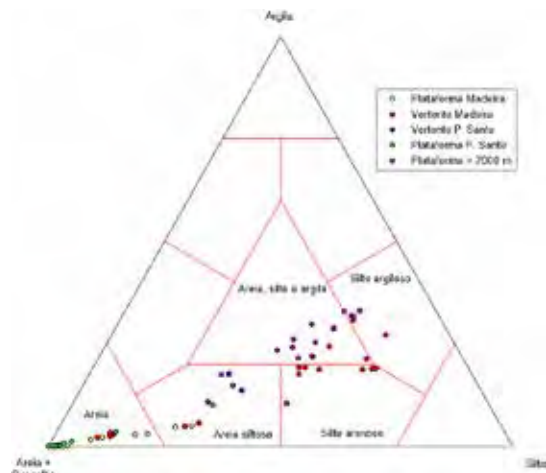


Fig. 2. Classificação textural das amostras no diagrama ternário de Shepard (1954).

A fração cascalhenta é vestigial (percentagens inferiores a 10%) e restrita apenas às zonas de plataforma. Já as frações finas (argila e silte) apresentam uma variação nítida ao longo do traçado, observando-se ainda algumas diferenças entre as duas ilhas. Assim, na Zona Profunda (> 2000 m), a componente silteosa é predominante, com percentagens superiores a 40%, sendo nítido o seu decréscimo em direção à ilha de Porto Santo, o que poderá estar relacionado com o maior fornecimento relativo de partículas terrígenas da ilha da Madeira. A fração argilosa tem valores superiores a 20% apenas abaixo dos 800m de profundidade, sendo quase vestigial em ambas as plataformas insulares.

Considerando a média granulométrica dos solos marinhos, considera-se que, junto à ilha da Madeira, os solos são essencialmente constituídos por areias finas a muito finas (Fig. 3), com teores de carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ) variando entre os 0 e os 25% (Fig. 4).

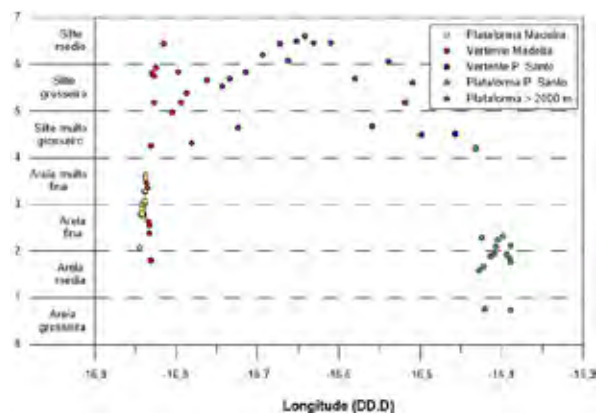


Fig. 3. Distribuição da média granulométrica dos solos marinhos ao longo do corredor.

Já na plataforma insular do Porto Santo, os solos marinhos são ligeiramente mais grosseiros,

apresentando-se como areias médias e finas, muito carbonatadas, com teores de  $\text{CaCO}_3$  que variam entre os 58 e 83% (Fig. 3 e 4).

Na zona mais profunda (> 2000 m) os solos marinhos são, no geral, constituídos por siltes (médias variando entre os 4 e 7  $\phi$ ; Fig. 3), com um teor de carbonato de cálcio que tende a aumentar progressivamente em direção à ilha do Porto Santo (Fig. 4).

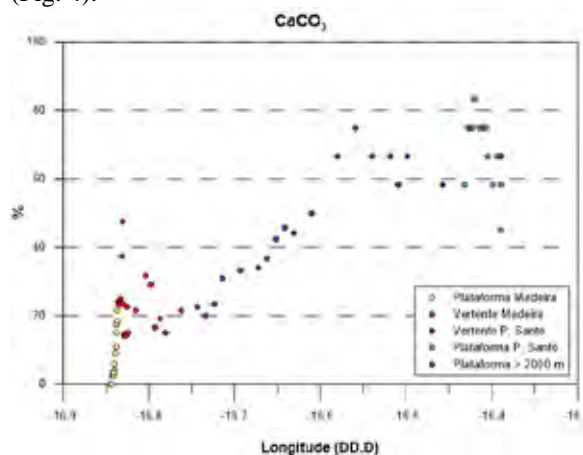


Fig. 4. Distribuição do teor em  $\text{CaCO}_3$  dos solos ao longo do corredor.

### 3.2. Caracterização da coluna sedimentar

No presente artigo apresentam-se apenas os resultados para 3 amostras verticais colhidas ao longo do traçado do cabo elétrico (Fig. 1).

#### 3.2.1. Suscetibilidade magnética

A amostra E31 (Fig. 5) colhida no talude da ilha da Madeira, apresenta um perfil de suscetibilidade magnética caracterizado por diferentes graus de suscetibilidade à magnetização.

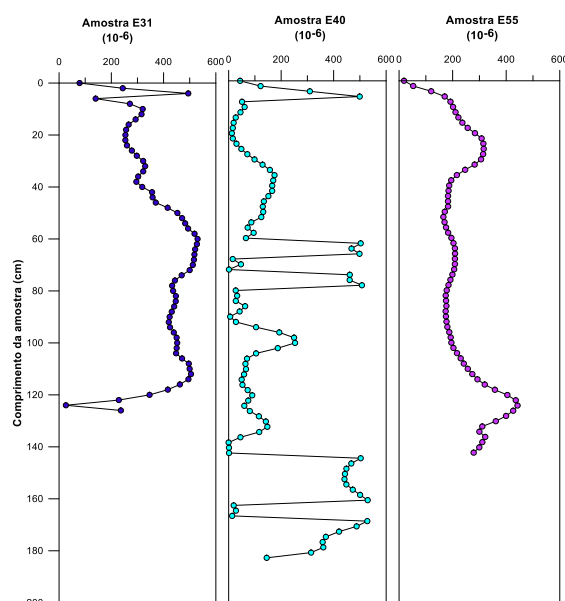


Fig. 5. Suscetibilidade magnética das amostras verticais E31, E40 e E55.

Considerando a sua localização e o caráter vulcânico da fonte terrestre mais próxima, esta alternância poderá refletir mudanças no regime de fornecimento de partículas para a bacia profunda.

Os resultados da suscetibilidade magnética da amostra E40 (Fig. 5), colhida a cerca de 2100 m de profundidade, revelam a ocorrência de uma coluna sedimentar finamente estratificada, com níveis ricos de partículas magnéticas de origem terrígena alternando com níveis de materiais paramagnéticos (susceptibilidades próximas de zero). Os primeiros poderão corresponder a episódios turbidíticos, que alternam com níveis de sedimentação pelágica de origem biogénica (solos carbonatados, silicatados ou calcíficos).

A amostra E55 (Fig. 5) está localizada mais perto da ilha do Porto Santo e o perfil de suscetibilidade magnética revela variações graduais e suaves dos teores de partículas magnéticas. Dada a localização da amostra, próximo à base do talude da ilha do Porto Santo, este comportamento é compatível com a variabilidade nos processos de dinâmica sedimentar deste local da bacia oceânica. A variação do sinal, à semelhança da amostra E40, justifica-se com a variação dos contributos das diferentes fontes de partículas sedimentares.

### 3.2.2. Velocidade de propagação das ondas P

A velocidade média de propagação das ondas P na amostra vertical E31 (Fig. 6) é da ordem dos 1575 m/s, não apresentando grandes variações ao longo de toda a coluna sedimentar analisada. Esta homogeneidade dos valores e a sua reduzida magnitude são compatíveis com a natureza dos solos marinhos, sendo provavelmente compostos por lodos sem grande variabilidade textural.

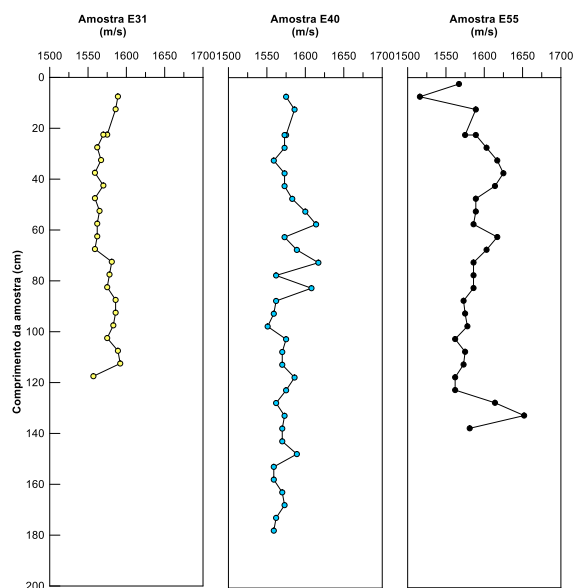


Fig. 6. Velocidade de propagação das ondas P nas amostras E31, E40 e E55.

A amostra E40 (Fig. 6) apresenta velocidades médias de propagação que variam entre os 1 525 m/s e os 1 625 m/s. Ao longo da coluna sedimentar verificam-se variações na velocidade de propagação das ondas P, justificadas pela alternância textural, havendo concordância destas com o comportamento da suscetibilidade magnética patente na Fig. 5.

O gráfico referente à amostra E55 (Fig. 6) mostra também uma variação da velocidade de propagação das ondas P ao longo da coluna sedimentar, concordante com a alternância de níveis com diferentes características sedimentológicas e que justificam a suscetibilidade magnética observada.

### 3.2.3. Ensaios triaxiais

Para determinar a resistência dos solos marinhos presentes nas três posições estudadas realizaram-se, em provetes extraídos das amostras verticais (Tab. I e II), ensaios de compressão triaxial não consolidados não drenados (UU).

Tabela I. Parâmetros texturais dos solos dos provetes ensaiados.

Amostra	Provete	Classes texturais				Classificação
		Cascalho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
E55VC	P1	0,00	20,81	43,91	35,28	Areia, silte e argila
	P2	0,00	23,76	44,12	32,12	Areia, silte e argila
	P3	0,00	27,88	45,89	26,42	Areia, silte e argila
E40VC	P4	0,00	25,20	51,55	23,20	Areia, silte e argila
	P5	0,00	25,87	48,62	25,51	Areia, silte e argila
	P6	0,00	25,49	48,73	25,79	Areia, silte e argila
E31VC	P7	0,00	23,29	54,30	22,40	Areia, silte e argila
	P8	0,00	19,22	57,58	23,21	Silte argiloso
	P9	0,00	15,37	58,57	26,05	Silte argiloso

Tabela II. Parâmetros físicos dos provetes ensaiados.

Amostra	Provete	Pressão Conf. (kPa)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Peso húmido (g)	Peso seco (g)	Teor água inicial (%)	Teor água final (%)	Peso volumico seco (kN/m <sup>3</sup> )
E55	P1	43	70	140	894,54	563,5	67,8	61,0	10,2
	P2	100			913,2	575,9	58,6	58,5	10,5
	P3	198			961,1	651,2	46,7	49,5	11,8
E40	P4	100			901,6	663,6	60,7	66,0	10,1
	P5	200			935,0	598,4	65,0	68,7	10,9
	P6	300			938,5	603,3	54,3	58,1	11,0
E31	P7	200			964,4	605,8	59,2	51,2	11,0
	P8	300			958,7	612,5	56,2	54,4	11,1
	P9	100			967,9	622,4	55,5	-	11,3

No geral, os solos marinhos amostrados são finos, sendo o silte a classe textural maioritária, seguida da argila e da areia, que é de origem biogénica.

Da análise da tabela II, constata-se que o teor em água, nos provetes seccionados da amostra E55, é mais alto, cerca de 10%, nos provetes P1 e P2, enquanto que o peso volumico seco, é mais elevado no provete P3. O grau de saturação é de 98% no provete P1 e de 100% nos provetes P2 e P3.

Relativamente ao teor em água dos provetes seccionados da amostra E40, os valores variam entre 61% (P4) e 54,3% (P6). O grau de saturação destes provetes (P4, P5 e P6) é similar e é da ordem de 102%.

Relativamente à amostra E31, o teor em água é mais elevado no P7 (59%) do que nos outros dois provetes (cerca de 56%). O peso volúmico seco é semelhante nos três e o grau de saturação é de 107% no P7, 104% no P8 e 105% no P9.

No que diz respeito aos resultados obtidos nos ensaios triaxiais, a resistência ao corte não drenada ( $c_u$ ) de cada um dos provetes encontra-se representada na tabela III.

Tabela III. Resistência ao corte não drenada.

Amostra	Provete	$c_u$ (kPa)
E55	P1	11.6
	P2	17.7
	P3	25.5
E40	P4	15.9
	P5	29.6
	P6	34.0
E31	P7	16.5
	P8	22.6
	P9	20.7

De acordo com os resultados obtidos, a resistência ao corte não drenada dos 9 provetes varia, sensivelmente, entre 12 e 34 kPa. No geral, a resistência ao corte não drenada dos solos analisados é baixa.

Os solos presentes na zona do talude da ilha do Porto Santo, caracterizados pela amostra E55, apresentam uma resistência que varia entre 11,6 e 25,5 kPa, sendo maior nos provetes P2 e P3 do que no P1, o que pode ser justificado pelo teor em água e peso volúmico destes provetes.

Os solos presentes na zona do talude da ilha da Madeira, caracterizados pela amostra E31, têm resistências que variam entre os 16,5 e os 22,6 kPa. A menor resistência apresentada pelo P7 está diretamente relacionada com o maior teor em água dos solos deste provete.

Os provetes P4 a P6 caracterizam os solos da bacia oceânica, sensivelmente a meio das duas ilhas. A resistência dos solos neste ponto varia entre os 15,9 e os 34 kPa, sendo mais elevada nos P5 e P6, provetes com menor teor em água.

#### 4. CONCLUSÕES

A metodologia descrita no presente estudo revelou-se correta e adequada na caracterização das características mecânicas do fundo marinho ao longo do traçado para roteamento do cabo elétrico entre as ilhas da Madeira e do Porto Santo.

As mais de 60 amostras de solos marinhos colhidas ao longo do traçado para o cabo elétrico, permitiram conhecer com detalhe as suas características (Rodrigues *et al.*, 2017), as quais refletem os processos de dinâmica sedimentar que caracteriza o ambiente marinho daquele setor atlântico.

Junto à ilha da Madeira, os solos marinhos são essencialmente constituídos por areias finas a muito finas, com teores de  $\text{CaCO}_3$  que variam entre os 0 e cerca de 25%, enquanto que, no setor da ilha do Porto Santo, os solos são ligeiramente mais grosseiros, apresentando-se como areias médias e finas muito carbonatadas, com teores de  $\text{CaCO}_3$  variando entre os 58 e 83%. Na zona mais profunda a fração siltosa é dominante e os teores de  $\text{CaCO}_3$  crescem em direção à ilha do Porto Santo.

Os ensaios não destrutivos, realizados às amostras verticais, evidenciam a existência de eventos de transporte sedimentar (possivelmente turbidíticos), dando origem à alternância de níveis com diferentes proveniências (terrígena ou pelágica) e/ou diferentes texturas. Esta estrutura interna é mais evidente nas amostras colhidas junto ao talude da ilha da Madeira do que na ilha do Porto Santo, o que está, provavelmente, associado aos fluxos detríticos desencadeados por elevadas precipitações e deslizamentos superficiais, transportados para a bacia oceânica através da rede fluvial e dos vales submarinos que ocorrem nesse setor da ilha da Madeira.

Os ensaios triaxiais realizados permitiram constatar que os solos marinhos ensaiados apresentam uma resistência ao corte não drenada baixa, variando entre os cerca de 12 a 34 kPa.

A especificidade dos solos, em conjugação com os obstáculos existentes no traçado previsto são fundamentais para a elaboração do projeto de dimensionamento e instalação do cabo submarino, pois permitem mitigar os riscos que possam afetar a sua integridade.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Elétrica da Madeira, S.A. que financiou este trabalho. Esta é uma contribuição do estudo “*Description of the sea bottom structure for the installation of an electric cable between Madeira and Porto Santo (complete version)*” financiado por esta entidade.

#### REFERÊNCIAS

- Inch Cape Offshore Limited. (2012). Offshore Environmental statement. Volume 2A. Appendix 6A: Export cable Feasibility study. Prepared for: Inch Cape Offshore Limited.
- Shepard, F. P. (1954) – Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. of Sedimentary Petrology*, Vol. 24, pp.151-158.
- Rodrigues, A., Vinhas, A., Lapa, N., Santos, R., Pombo, J., Fradique, C., Ferreira, F., Reis, L. (2017). Description of the sea bottom structure for the installation of an electric cable between Madeira and Porto Santo (complete version). *REL TF GM 06/2017*. 463 p. Lisboa.

# Galgamento em estruturas de proteção marginal face à subida de nível do mar

D. Pires (1), M. G. Neves (1,2) e F. S. B. F. Oliveira (2)

(1) Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia (FCT-UNL), Portugal.

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal

**Resumo:** O sistema de proteção costeira da Cova-Gala, a sul da Figueira da Foz, inclui defesas longitudinais aderentes datadas de 1975 que têm como objetivo proteger a povoação da ação do mar. Ao longo dos anos têm-se registado eventos de galgamento destas obras que colocam em risco pessoas e bens. Face a uma possível subida do nível do mar na costa oeste portuguesa, é importante analisar a sua influência no agravamento do galgamento destas estruturas. Para tal, calculou-se o galgamento com a fórmula de Mase *et al.* (2013) utilizando as condições de agitação ao largo e níveis de mar obtidas de modelos de *hindcast*. Calculou-se ainda o caudal galgado para as mesmas condições de agitação e diferentes projeções de subida do nível do mar. A comparação de resultados permitiu concluir sobre o efeito da subida do nível do mar no galgamento para os valores considerados.

**Palavras-chave:** galgamento, estruturas de proteção marginal, subida do nível do mar.

## 1. INTRODUÇÃO

As consequências das alterações climáticas são, atualmente, um motivo de preocupação, especialmente nas zonas costeiras. No caso específico de Portugal, dada a extensão da linha de costa, com cerca de 950km de comprimento, que alberga aproximadamente 75% população e onde se situam os grandes ativos económicos, sociais e ambientais do país, é premente o conhecimento das possíveis consequências da subida do nível do mar.

Uma das consequências mais relevantes das alterações climáticas no litoral de Portugal Continental, segundo Andrade *et al.* (2008), é o aumento do nível médio do mar que, na década de 2000, foi de 2,5mm/ano. Por sua vez, um dos impactos mais relevantes da subida do nível do mar é o aumento das cotas de inundação o que leva a que, em zonas já protegidas por estruturas de proteção marginal, o galgamento possa aumentar para níveis acima do aceitável, pondo em risco população e bens.

Assim, é importante analisar qual a influência de uma possível subida do nível médio do mar no galgamento sobre as estruturas de proteção marginal existentes na costa.

Nesta comunicação analisa-se o efeito de uma possível subida do nível médio do mar no galgamento sobre uma estrutura de proteção marginal localizada na costa oeste portuguesa, mais concretamente na praia da Cova-Gala, a sul da Figueira da Foz. Nesta zona verificou-se um processo erosivo entre 1975-1978, que se acentuou no período 1978-2011, com diversos eventos de galgamento relatados (Oliveira *et al.*, 2016).

## 2. ZONA DE ESTUDO

### 2.1. Localização

A zona de estudo localiza-se a sul da Figueira da Foz, na frente marítima da Cova-Gala, mais concretamente na estrutura de defesa aderente localizada entre esporões (Figura 1). Esta zona é formada por um sistema arenoso praia-duna que evoluiu, desde meados do século passado, sob influência de intervenções humanas de diversos tipos.

As intervenções a sul da Figueira da Foz tornaram-se necessárias a partir dos anos 70, quando se agravou a erosão costeira a sul do molhe sul da embocadura do rio Mondego (Oliveira *et al.*, 2016). Em 1975 procedeu-se à construção das defesas longitudinais aderentes da Cova-Gala e entre 1978 e 1979 foi construído o campo de 5 esporões. Recentemente, entre 2008 e 2010, efetuou-se o prolongamento do molhe norte do Porto da Figueira da Foz, localizado a norte da zona em estudo, Fig. 1.



Fig. 1. Costa de Cova-Gala e estrutura de defesa aderente localizada entre dois esporões.



## 2.2. Agitação marítima

Os dados de agitação marítima utilizados resultam da aplicação de um modelo de onda espectral, validado, com uma resolução espacial de  $0.5^\circ$  e um passo temporal de 6 horas (Dodet *et al.*, 2010). O ponto utilizado, onde se dispõem dos valores de altura significativa de onda ( $H_s$ ), do período de pico ( $T_p$ ) e da direção média de incidência ( $Dir$ ) para o período de 1953 e 2009, tem coordenadas  $10.0^\circ W$  e  $40.0^\circ N$  e uma profundidade de -14 m (ZH).

A análise dos resultados permitiu determinar as características da agitação marítima para o período em análise, verificando-se alturas de onda significativas até 11,8 m, com 82% dos registos com  $H_s < 3$  m. Os períodos de pico eram inferiores a 28s, sendo que em 70% dos registos o  $T_p < 14$  s. Quanto às direções de incidência da agitação, esta foi bastante variável, embora em 80% dos registos se centra entre W e NW. Efetivamente 73% dos registos tem direções de agitação que diferem menos de  $20^\circ$  da perpendicular à linha de costa em análise (Figura 2).

Entre 1953 e 2009 foram registados 565 temporais no local em estudo, que variaram de 4 a 18 por ano (Figura 3), 91% dos quais ocorreram nos invernos marítimos.

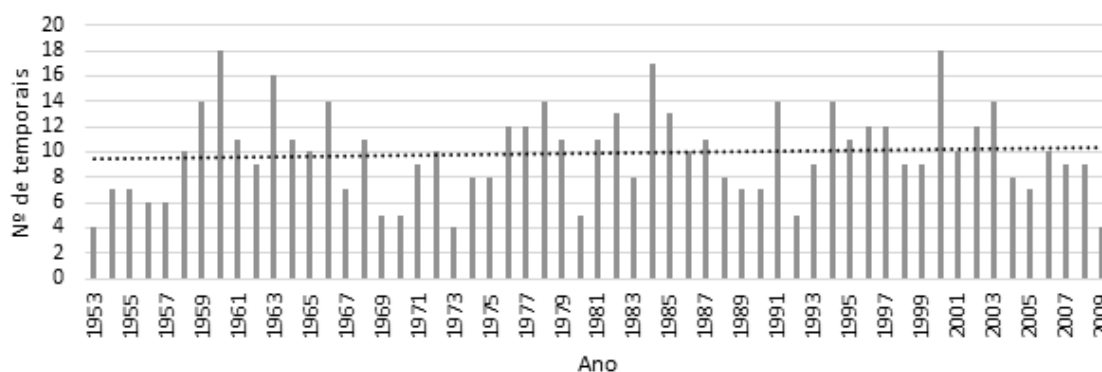


Fig. 3. Número de temporais entre 1953 e 2009.

A duração dos temporais variou entre os 0,25 e os 15,25 dias, com um total de 57% com duração inferior a 1,5 dias (Figura 4). Os temporais com duração superior a 5 dias ocorreram para direções entre  $258^\circ N$  e  $316^\circ N$  e períodos de pico entre 10s e 13 s.

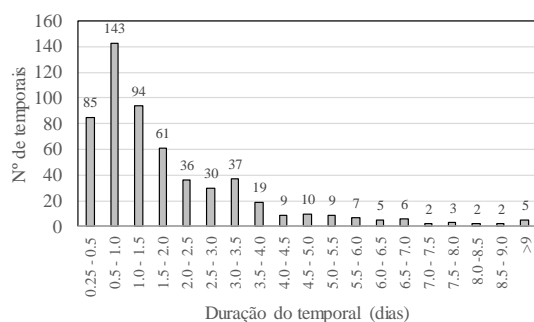


Fig. 4. Número de temporais em função da sua duração.



Fig. 2. Direções de agitação dos registos entre 1953 e 2009 e respetiva percentagem de dados.

Considerou-se que se estava em condições de temporal sempre que a altura significativa da onda fosse igual ou superior a 4,0 m, que permanecesse superior a esse valor por um mínimo de 12 horas. Considerou-se ainda que dois temporais são independentes quando a diferença de tempo entre eles seja superior a 48 horas, caso contrário estamos da presença do mesmo temporal.

O número de registo em condições de temporal corresponde a 7% do número total de registos.

## 2.3. Nível do mar

O nível do mar para o período em estudo corresponde ao resultado do modelo WXTide32 (Fortunato *et al.*, 2007) e inclui as componentes astronómica e meteorológica da maré.

Dos 86200 resultados de *hindcast*, apenas em 5% dos casos o nível de mar era superior a 3,5m, nunca excedendo 5m.

## 2.4. Perfil de praia

Para a zona costeira da frente marítima da Cova-Gala dispunha-se de três levantamentos topohidrográficos (Oliveira *et al.*, 2016): o de 1975 realizado pela Direção Geral de Portos, com as defesas longitudinais aderentes já construídas; em 1978, com o campo de esporões já construído, realizado pela Direção Geral de Portos; e o de 2011,

realizado pelo Instituto Geográfico Português e Instituto da Água, com tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), numa faixa de captura de um quilómetro de largura ao longo da costa, cerca de 600 m em mar (batimetria) e 400 m em terra (topografia), com resolução de 2 m.

Com base nessa informação, escolheu-se o perfil localizado entre o terceiro e o quarto esporão (Norte-Sul). Entre 1975 e 1978 o perfil transversal em análise apresentou estabilidade entre o ZH e o NMM, recuo entre o NMM e o nível 6 m ZH e assoreamento abaixo do ZH. Este comportamento pode dever-se à presença da defesa longitudinal aderente, que fixou o perfil acima do nível 6 m ZH, e ao enchimento artificial anual realizado a barlar entre 1973 e 1976, que terá sido transportado por ação das correntes litorais induzidas pelas ondas, predominantemente de norte para sul.

Entre 1978 e 2011 esta zona apresentou erosão abaixo do ZH e assoreamento acima deste nível, mais precisamente, acumulação de cerca de 280 m<sup>3</sup>/m de areia entre o ZH e o nível 6 m ZH.

Com base nestes perfis, definiu-se um perfil esquemático representativo da zona, que se apresenta na Figura 5.

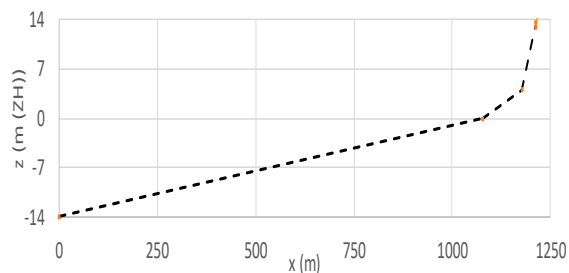


Fig. 5. Perfil esquemático representativo da zona de estudo.

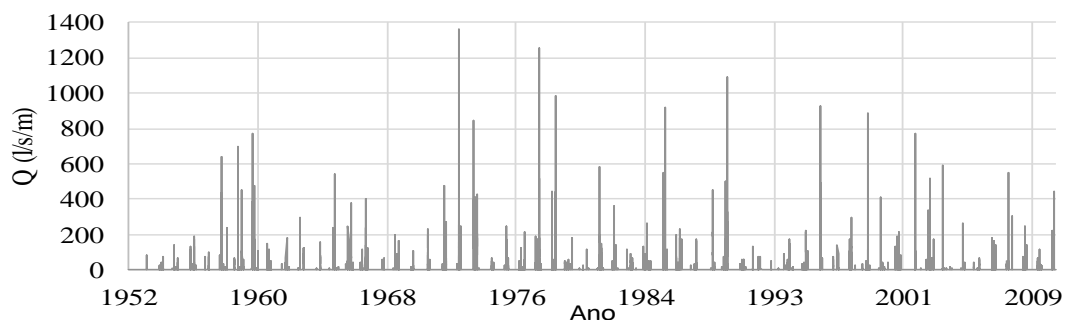


Fig. 6. Caudal médio galgado entre 1952 e 2009.

Dos 86200 registos correspondentes ao período em estudo, em 84% dos casos obteve-se galgamento nulo. Nos restantes 16%, e como se pode observar na Figura 6, o caudal foi variável, atingindo valores superiores a 1000 l/s/m em 1973, 1978 e 1990.

Em USACE (2002) são definidos os valores limites admissíveis propostos para a segurança: da

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Cálculo do galgamento

Para o cálculo do galgamento utilizou-se a fórmula de Mase *et al.* (2013), por ser a única que contempla o caso de estruturas cujo pé está localizado acima da linha da costa. Esta fórmula utiliza, como dados de entrada, as características da agitação em águas profundas ou intermédias e adota o conceito de declive imaginário para o cálculo do espraio e galgamento, uma vez que o declive da frente da estrutura nem sempre é uniforme. Esse declive corresponde a uma linha que une um ponto sobre o fundo localizado à profundidade a que ocorre rebentação e o outro no limite do espraio, considerando que a estrutura tem um declive infinito. Como tal, o caudal obtido deve ser multiplicado por um fator de redução de forma a ter em conta o efeito da largura da berma no galgamento (Besley, 1999). Nesta fórmula o galgamento é calculado com base no valor da cota de espraio com 2% de probabilidade de ser excedida, Ru2%, que é afetada por um fator de redução que tem em conta a rugosidade de todo o talude (estrutura e frente de praia). No presente caso de estudo considerou-se este fator de redução igual a 0.9. A fórmula, por ser baseada em ensaios bidimensionais, considera que a agitação incide perpendicularmente à estrutura.

Assim, calculou-se o caudal médio galgado, Q, sobre uma estrutura de proteção marginal localizada praia da Cova-Gala, tendo em conta as condições de estado do mar (agitação marítima e nível do mar) apresentadas na secção 2 para os anos de 1953 a 2009 e perfil apresentado em 2.3.

#### 3.2 Resultados

Na Figura 6 apresenta-se os valores de Q para os anos em análise.

circulação de veículos,  $Q=0,01$  l/s/m; da circulação de pessoas,  $Q=0,1$  l/s/m; de propriedades existentes num raio de 5/10m da estrutura,  $Q=0,4$  l/s/m; e da estrutura de proteção,  $Q=200$  l/s/m. Assim, calculou-se a probabilidade de ocorrência de galgamentos, dada pela razão entre o número de vezes que dado limite é ultrapassado e o número total de registos, para os diferentes limites definidos.

Na Tabela I apresenta-se a probabilidade de ocorrência para cada um dos limites referidos e ainda o número máximo de registos acima do valor limite num ano e o ano respetivo.

Como se pode observar, a probabilidade de ocorrência de danos em edifícios é muito pequena. Os caudais superiores a 200 l/s/m estão associados a temporais com Hs entre 8 e 11.7 m, Tp entre 16 e 22.5 s e direções entre W e WNW. Efetivamente, há registo de danos, concretamente, destruição de passadiços e danos relevantes na defesa longitudinal, durante o temporal de janeiro de 2014 (Pinto, 2014), cuja direção era de aproximadamente WNW, e com alturas de onda significativas registadas em Sines que atingiram os 9m com períodos de zero ascendente da ordem dos 16-17s.

Tabela I. Probabilidade de ocorrência de galgamentos e máximo número de registos por ano e ano de ocorrência.

[l/s/m]	Probabilidade de ocorrência (%)	nº máximo de registos/ano (ano)
Q>0,01	7.6%	190 (1972)
Q>0,1	5.7%	108 (1972)
Q>0,4	4.4%	124 (1972)
Q>200	0.1%	9 (1959/1996)

A probabilidade de danos para pessoas, embora inferior a 10%, já é importante. As condições de agitação associadas a caudais superiores a 0,1 l/s/m são bastante mais abrangentes, com Hs a variarem entre 3.6 e 11.7m, Tp entre 11 e 27 s e direções entre WSW e NW.

Calculou-se ainda o Q para as mesmas condições de agitação, mas considerando uma subida do nível médio do mar de 2,5 mm/ano (Andrade *et al.*, 2008), e duas vezes este valor, isto é, 5 mm/ano. Verificou-se que a subida do nível do mar leva a um aumento do caudal galgado sobre a estrutura, tal como esperado.

Relativamente à probabilidade de ocorrência do galgamento para diferentes taxas de subida do nível do mar, na Figura 8 e na Tabela II apresentam-se os resultados obtidos sem alterações, com uma subida do nível do mar de 2,5mm/ano e de 5,0mm/ano.

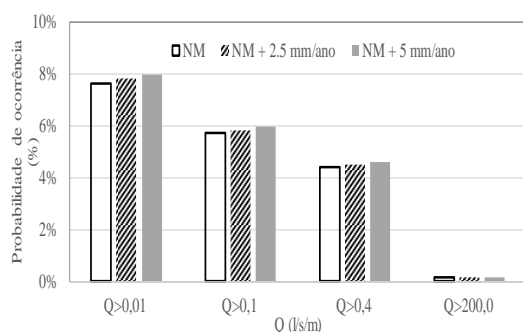


Fig. 8. Variação da probabilidade de ocorrência de galgamentos acima dos valores admissíveis com a subida do nível de mar.

Tabela II. Probabilidade de ocorrência de galgamentos acima dos valores admissíveis para diferentes taxas de subida de nível do mar.

Q [l/s/m]	NM	NM+ 2.5 mm/ano	NM + 5 mm/ano
Q>0,01	7.6%	7.8%	8.0%
Q>0,1	5.7%	5.8%	5.9%
Q>0,4	4.4%	4.5%	4.6%
Q>200,0	0.1%	0.1%	0.2%

Da análise da Figura 8 e da Tabela II verifica-se que há um aumento da probabilidade de ocorrência com a subida do nível do mar, no entanto ela é sempre inferior a 0.5%.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento do Projeto PROTOCOL - Protecção de frentes urbanas costeras frente al calentamiento global, CYTED 2017-PE-PROTOCOL.

### REFERÊNCIAS

- Andrade, C., Freitas, M. C., Santos, F.C. (2008). Sector de Zonas Costeiras, Estratégia Nac. Adapt. aos Impactos das Alterações Climáticas Relac. com os Recur. Hídricos, 14 pag.
- Besley, P. (1999). *Overtopping of seawalls – design and assessment manual*, R&D Technical Report W 178, Environment Agency, Bristol 37 pp.
- Dodet, G., Bertin, X. e Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades, *Ocean Model.*, 31, 3–4, 120–131.
- Fortunato, A. B., Rodrigues, M. (2007). Modelação da inundação costeira na ria de Aveiro, *11º Congresso da água, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, Porto, 1–15.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S. e Reis, M. T. (2013). Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water” *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, 139, 346–357.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F. e Teixeira, A.A.T. (2016). Evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego: modelação do impacte do prolongamento do molhe norte. *Actas das 4ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico*, Lisboa, 245-248.
- Pinto, A. C. (2014). *Registo das ocorrências no litoral*. Relatório técnico, Agência Portuguesa do Ambiente, 123 pp.
- USACE (2002). *Coastal Engineering Manual*, U. S. Army Corps of Engineering, Vicksburg: Coastal and Hydraulics Laboratory.

# Increase the Autonomy of Oceanographic Monitoring Stations with a Submersible Energy Harvester

C. L. Faria(1), M.S. Martins(1), R. Lima(2), L.M. Goncalves(1)

(1) Universidade do Minho, CMEMS, Campus de Azurém 4800-058 Guimarães; carlosfaria@dei.uminho.pt

(2) Universidade do Minho, DEM, Campus de Azurém 4800-058 Guimarães

**Abstract:** One of the sea monitoring systems challenges is to increase their uptime and reduce the battery replacement logistics. An energy harvesting device, manufactured by a 3D printer using polylactic acid filaments (PLA), was tested to work underwater and capable of produce an electric power of 50 mW with 4.46 Hz of wave movement. A linear electromagnetic generator (LEG), with cylindrical configuration and dimensions of 98 mm of length and 25.5 mm in diameter was placed inside of device. The energy production is achieved by the oscillatory movements and marine currents. The device can be used to power submerged monitoring sensors that are anchored to the seabed or are operating on the surface. For larger systems, if more power is needed, more devices can be added. Currently, the main body of the device containing the LEG has the dimensions of 0.14 x 0.23 x 0.26 m<sup>3</sup>.

**Keywords:** Electromagnetic Energy harvesting, Submersible energy harvesting, Electromagnetic Linear Generator, Submersible energy buoy, Ocean Energy

## 1. INTRODUCTION

In last decades, the human activities had an impact on the economy and biodiversity of the ocean. There is a demand to acquire and measure some variables, such as pH (S.Deweerd, 2017), chlorophyll, salinity, conductivity, among others (S. Schmidtko, 2017), to study the influence of this activity on the ocean.

To obtain these variables, sensors and electronics are needed. However, with the advance of electronics miniaturization, the electric power requirements of these are low.

The typical sensors power supply is through the use of batteries. Nowadays, it is possible to operate these sensors for weeks or even months, however is still necessary to replace their batteries to operate in longer periods of time. This is an important concern because ocean conditions not always allow the replacement of batteries, or the logistic costs to perform this maintenance is very high.

Some work was done before in energy harvesting, to increase the operation time or convert these systems to energetically autonomous systems. In the micro and milliwatt range, many harvesters have been developed using several kinds of energy sources (like solar, thermal, vibration electromagnetic, etc.), and conversion mechanisms (photovoltaic, thermoelectric, piezoelectric, electromagnetic, etc.) (C.L.Faria et al., 2017). However, almost all milliwatt energy harvesters are developed to capture the ambient energy and conversion principle is not replicable in underwater applications (A. Harb, 2011). At small depths, one of the main energy

sources available are wave and currents movements. For these application, the magnetic generators shows an adequate efficiency (Min-Chie Chiu et al., 2017). The purposed device, based on a linear electromagnetic generator (LEG), captures energy from currents and oscillation movement (J. Falnes, 2002) and converts it to electric energy. Figure 1 presents the device geometry, with two lateral shovels that helps the capture of water movements.

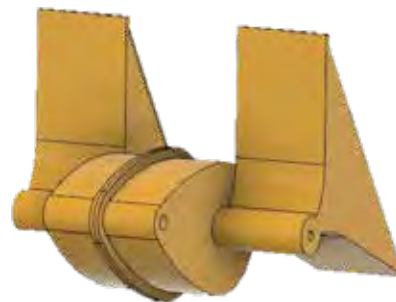


Fig. 1. Energy harvester device.

Inertia differences of generator body and internal guided magnets, together with gravity and immersion forces, are used with magnets and coils to convert movements to electric energy, with the following advantages:

- Construction of the devices by 3D printing is simple and low cost (Javeed Shaikh Mohammed, 2016)
- The system can be used to convert both the oscillating and linear movements, obtained respectively by waves and currents/tides.

- The device is completely submerged thus avoiding conflicting with marine navigation.
- No outside moving parts exist to reduced biofouling problems, (L. Delauney and et al., 2010).

Figure 2 presents the placement of LEG inside the energy harvester prototype.

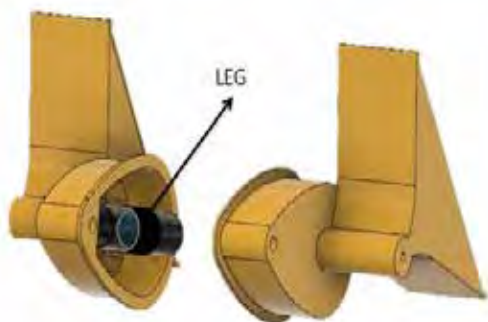


Fig. 2. Energy harvester prototype with LEG inside.

Inside the LEG, as presented in figure 3, a cylindrical magnet N42 (driven by oscillations/water currents) creates the magnetic field. To produce an electric current, the magnet will pass through a coil.

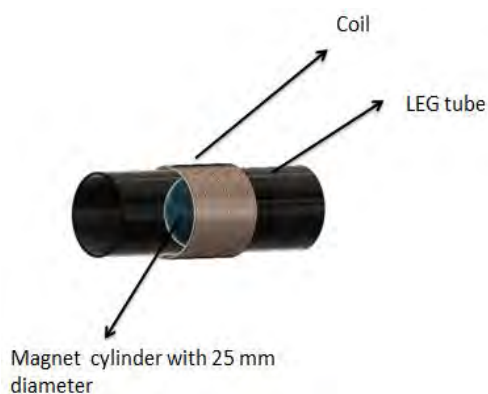


Fig. 3. LEG components.

## 2. FABRICATION

The energy harvester device and LEG tube were manufactured in the 3D printer with polylactic acid (PLA) filament (Y.Rudeekit et al., 2008). In figure 4 illustrate the device manufactured in PLA filament in a 3D printer. The LEG tube has 25.5 mm of interior diameter and 98 mm length. The coil has 21.5 mm width and the copper coil has 1297 turns of 0.11mm diameter copper wire). Inside of LEG a NdFeB cylindrical magnet type N42 is inserted, with 1.32 T of residual magnetism. The dimension of magnet is 25.4 mm of diameter and 7.0 mm of width. The direction of magnetization is axial (parallel to width). A resistance of 77.6  $\Omega$  was measured in the coil.

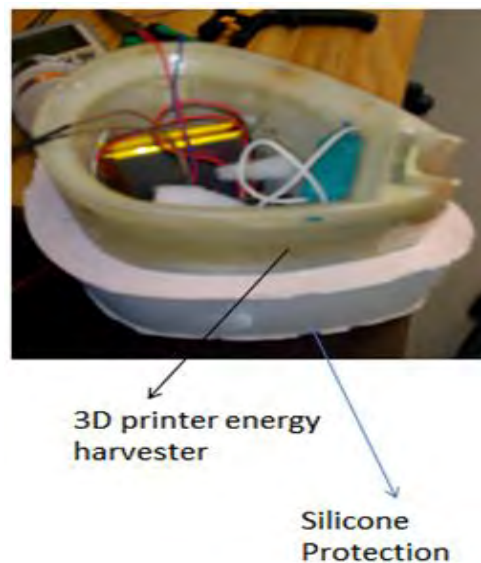


Fig. 4. Prototype inside view.

## 3. TEST AND RESULTS

Tests were performed in the laboratory, to evaluate the LEG performance. The device was tested with mechanical oscillations with frequencies from 0.3 Hz to 4.46 Hz.

The generated voltage was measured with different resistive loads, from 22  $\Omega$  to 1500  $\Omega$ . Theoretical results show that maximum power ( $P_{MAX}$ ) expected with a load resistor equivalent to an internal resistor of the coil,  $R_i=77.6 \Omega$ , for a given open circuit voltage (VO).

$$P_{MAX} = \frac{V_0^2}{4 \cdot R_i} \quad (1)$$

As a typical example, figure 5 illustrates the generated voltage with a 4 Hz movement when a load resistor of 100  $\Omega$  was used. The RMS (root medium square) voltage of 2.17 V was measured, with maximum peak to peak amplitude from -5.83 V to +3.5V.

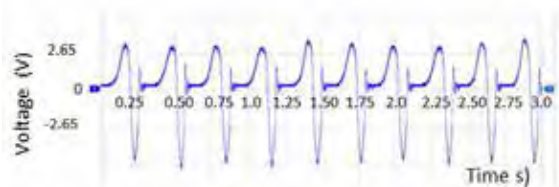


Fig. 5. Generated voltage with a 4 Hz movement, with a load resistor of 100  $\Omega$  is used.

With an electric load value equivalent to the generator internal impedance the maximum power was obtained. Using several oscillatory movement frequencies with a matched load resistance (78  $\Omega$ ) the generated power presented in figure 6 was measured. The power increases with an oscillation frequency, and a maximum power of 52 mW was measured for a single coil LEG.

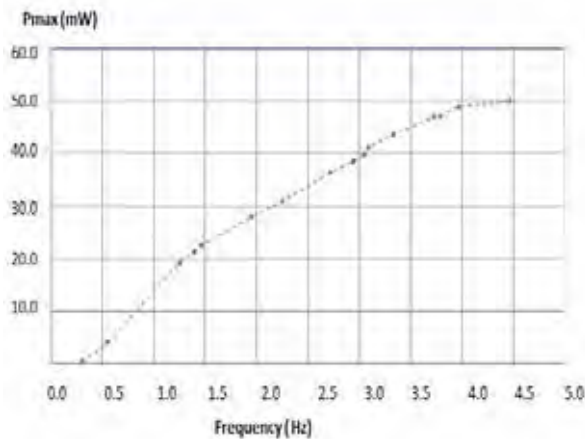


Fig. 6. Maximum harvested power as function of frequency (a load resistance matched to the internal resistance of the device was used to maximize output power).

Tests were performed in the river, to evaluate the movement performance. The device was tested with velocities of 0.11 and 0.18 m/s in river.

The figure 7, illustrates the rotation per minute with velocity of water.

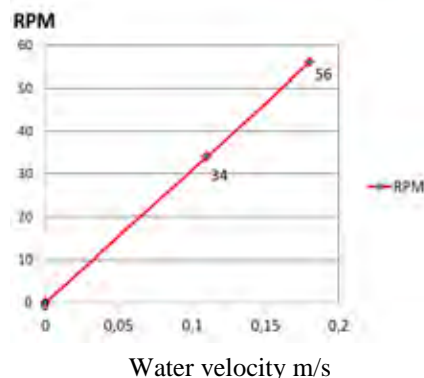


Fig. 7. The RPM vs Velocity of water current.

#### 4. CONCLUSION

A small and low-cost device to harvest energy from water movement and to power submerged seawater monitoring devices is presented. Biofouling problems are avoided since the device have no external moving parts. The use of 3D printing technology to manufacture the device is an advantage because it can easily be replaced when it is damaged or lost. The low cost and small dimensions characteristic can promote the development of future underwater networks of marine sensing devices. Several oscillatory movement frequencies were tested and different power values were obtained. Generated power increases with the increase of the oscillation frequency, and a maximum power of 52 mW was measured at 4.46 Hz. Maximum power was obtained with a load value equivalent to the coil resistance. Even at a frequency of 1.46 Hz, a maximum power of 22 mW was measured. With this power value, it

is possible powering many low-power measurement sensors, as turbidity, chlorophyll, CTD or pH sensors by reducing the sampling frequency. Using larger coils or higher magnet mass, or both, it is possible to optimize the LEG to produce higher power. Future works will pursue the goal of 100 mW of electric power.

#### Acknowledgements

This work was co-financed by Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), through Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), Project NORTE-01-0145-FEDER-000032 – NextSea.

M. S. Martins thanks FCT for the grant SFRH/BPD/107826/2015.

#### REFERENCES

- Harb, A. (2011). Energy harvesting: State-of-the-art Renew. *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641–2654.
- Faria, C.L., Martins, M.S., Lima, R., Gonçalves, L.M. (2017). Energy Harvesting to Supply Moored Oceanographic Monitoring Stations, OCEANS 2017, Aberdeen, Scotland, 19-22 June.
- Falnes, J. (2002). Wave-Body Interactions, Ocean Waves and Oscillating Systems, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 118-186, ISBN 0-511-0393-2.
- Mohammed, J.S. (2016). Applications of 3D printing technologies in oceanography, *Methods in Oceanography*, 17 97–117.
- DeLauney, L., Compare, C. and Lehaitre, M. (2010). Biofouling protection for marine environmental sensors. *Ocean Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 503–511.
- Chiu, M.C., Karkoub, M. and Her, M.G. (2017). Energy harvesting devices for subsea sensors, *Renewable Energy*, vol.101, pp. 1334-1347.
- Deweerd, S. (2017). Sea change, *Nature*, vol. 550, no. 7675, pp. S54–S58.
- Schmidt, S. L., Stramma and Visbeck M. (2017), Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades, *Nature*, vol. 542, no. 7641, pp. 335–339.
- Deweerd, S. (2017). The increasing acidity of our seas is a threat to marine life that for many species may be impossible to overcome, S56, *Nature*, vol 550.
- Rudekit, Y., Numnoi J., Tajan M., P. Chaiwutthinan, Leejarkpai T. (2008). Determining biodegradability of polylactic acid under different environments, *J. Met. Mater. Miner.* 18 (2) 83–87.

# Estudo de dependência de malha em simulações numéricas de hidrodinâmica utilizando o código OpenFOAM

J. M. P. Conde (1)

(1) UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica. jpc@fct.unl.pt.

**Resumo:** No presente artigo apresentam-se simulações numéricas feitas utilizando o código OpenFOAM para o escoamento bifásico com superfície livre correspondente à queda de uma coluna de água. Foi utilizado o *solver interFoam* que resolve as equações de Navier-Stokes em regime transitório e utiliza a técnica VoF (*Volume of Fluid*) para identificar a superfície livre. Apresenta-se um estudo da dependência da solução com o refinamento da malha utilizando o método do índice de convergência da malha, GCI (*Grid Convergence Index*), e são comparados os resultados numéricos com os obtidos por outros autores em estudos experimentais. Constatou-se uma boa correspondência entre os resultados numéricos obtidos no âmbito deste trabalho e os dados experimentais. Obteve-se convergência monotónica com o refinamento da malha, para a posição da frente de onda e para o nível da superfície livre.

**Palavras-chave:** Queda de uma Coluna de Água, OpenFOAM, Equações de Navier-Stokes, VoF, V&V, GCI.

## 1. INTRODUÇÃO

Os escoamentos bifásicos com superfície livre em regime transitório podem ser encontrados num grande número de aplicações nos domínios da ciência e da engenharia. O desenvolvimento e aplicação de métodos computacionais eficientes e precisos para descrever estes escoamentos complexos têm sido um tema amplamente abordado nas últimas décadas. Existem inúmeras técnicas/métodos numéricos para resolver os mais variados problemas: métodos de elementos finitos, métodos de diferenças/volumes finitos, métodos de partículas, etc. (Ferziger e Peric, 2002).

Recentemente, graças ao aumento das capacidades computacionais, os códigos que resolvem as equações de Navier-Stokes em valor médio, RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes), utilizando a técnica VoF (*Volume of Fluid*) para identificar a superfície livre, tornaram-se de uso generalizado em vários domínios da engenharia (Jacobsen *et al.*, 2012). As equações RANS têm a vantagem de permitir determinar, por exemplo, as características da turbulência que ocorre na zona de rebentação e os esforços resultantes dos impactos das ondas nas estruturas costeiras.

Neste artigo apresenta-se a aplicação do código OpenFOAM (OpenCFD, 2018) à queda de uma coluna de água. É feito um estudo da dependência da solução com o refinamento da malha e comparados os resultados com dados experimentais.

## 2. CÓDIGO NUMÉRICO

O código OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) é um pacote de software (bibliotecas), em linguagem de programação C++, gratuito e de código fonte aberto (*Open Source*) que pode ser utilizado para a resolução de problemas de mecânica dos fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), entre outros. O OpenFOAM dispõe e permite criar aplicações que se dividem em duas categorias: *Solvers*, que são desenvolvidos para resolver um problema específico; e *Utilities*, que são concebidos para executar tarefas que envolvem a manipulação e processamento de dados (OpenCFD, 2018). O código OpenFOAM é tradicionalmente compilado em sistema operativo Linux, no presente caso foi utilizado o UBUNTU 1604LTS.

Foi utilizado o *solver interFoam* que permite resolver escoamentos bifásicos com superfície livre. Este solver resolve as equações RANS, Eq. (1), e da continuidade, Eq. (2), para dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, juntamente com a equação de transporte da fracção de volume,  $\alpha$ , que toma o valor 0 no ar e 1 na água, Eq. (3).

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T] = -\nabla p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}] + \sigma_T \kappa_\alpha \nabla \alpha \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (3)$$

Nestas equações,  $\mathbf{u} = (u \ v \ w)$  é o campo de velocidades em coordenadas cartesianas  $\mathbf{x} = (x \ y \ z)$ ,

$p^*$  é a pressão subtraindo a componente hidrostática,  $\mathbf{g}$  a aceleração gravitacional,  $\rho$  a massa volúmica e  $\mu$  a viscosidade dinâmica molecular. O último termo da Eq. (1) contabiliza o efeito da tensão superficial, onde  $\sigma_T$  é a tensão superficial e  $\kappa_\alpha$  a curvatura da superfície. O tensor das tensões de Reynolds é definido pela Eq. (4) onde  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta,  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $\mathbf{I}$  é o tensor unitário. Na equação de transporte da fração de volume, Eq. (3), o último termo do membro esquerdo é um termo compressivo estabilizador da superfície livre, sendo  $\mathbf{u}$ , é a velocidade relativa (Jacobsen *et al.*, 2012).

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{2}{\rho} \mu_t \left[ \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (4)$$

Este solver utiliza o método limitador multidimensional universal para solução explícita, MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*), para manter os limites da fração de volume independentes do esquema numérico e da estrutura da malha. O algoritmo utilizado pelo solver na versão utilizada (v. 1712) é o PIMPLE, trata-se de uma combinação dos algoritmos PISO e SIMPLE (OpenCFD, 2018).

### 3. ESTIMAÇÃO DO ERRO NUMÉRICO

A qualidade das simulações numéricas pode ser aferida pelo processo designado de Verificação e Validação (V&V). De acordo com norma ASME V&V20-2009 (ASME, 2009), na V&V o objetivo final é a validação, esta corresponde ao processo de determinar a precisão com que um modelo matemático representa a realidade do ponto de vista dos usos pretendidos do modelo. A validação corresponde a comparar resultados da simulação para variáveis relevantes em localizações relevantes com dados experimentais correspondentes. No entanto, a validação deve ser precedida pela verificação. Esta é composta de duas etapas: a verificação do código; e a verificação da solução. A verificação de código tem por objectivo verificar que o código resolve com precisão o modelo implementado, ou seja, efectuar uma avaliação dos erros por comparação com uma solução conhecida. A verificação da solução consiste em determinar uma estimativa da incerteza numérica de um cálculo específico.

O erro numérico é consequência de três contribuições: do erro de arredondamento; do erro iterativo; e do erro de discretização (Roache, 2009).

O erro de arredondamento é devido à precisão finita dos computadores e tende a aumentar com o refinamento da malha. Neste trabalho os cálculos foram efectuados em precisão dupla de forma a tornar o erro de arredondamento desprezável. O erro iterativo é devido ao carácter não linear do sistema de equações que se está a resolver e é desprezável

quando é 3 ordens de grandeza menor que o erro de discretização (Eça e Hoekstra, 2006).

O erro de discretização,  $e_d(\phi)$ , pode ser obtido pelo procedimento de extrapolação de Richardson, onde  $\phi_i$  é a solução para uma dada malha  $i$ ,  $\phi_0$  é uma estimativa da solução exacta para malha de dimensão infinitesimal,  $\alpha$  é uma constante,  $h_i$  é uma medida representativa da dimensão da malha e  $p$  é a ordem de convergência observada:

$$e_d(\phi) = \phi_i - \phi_0 = \alpha h_i^p \quad (5)$$

A estimativa da incerteza devida ao erro de discretização foi determinada pelo método do índice de convergência da malha (GCI – *Grid Convergence Index*):  $U = F_s |e_d|$ , onde  $F_s$  é um factor de segurança que pode tomar o valor 1.25 ou 3, caso se verifique ou não convergência monotónica (Roache, 2009).

O procedimento adoptado neste trabalho é o proposto por (Eça e Hoekstra, 2006) e corresponde a determinar  $\phi_0$ ,  $\alpha$  e  $p$  por uma aproximação por mínimos quadrados, utilizando 4 ou mais malhas sem restrições de relação  $h_{i+1}/h_i$  entre elas.

### 4. CASO DE ESTUDO

O colapso de uma coluna de água é um caso tradicional de verificação de códigos numéricos para escoamentos bifásicos. A facilidade com que se define este problema, combinada com a existência de muitos resultados numéricos, e alguns resultados experimentais, fazem desta simulação uma excelente referência para validação desses códigos.

O caso considerado tem como referência o ensaio experimental realizado por Koshizuka *et al.* (1995). Na Fig. 1 apresentam-se as dimensões do domínio ( $a = 0.146$  m), a condição inicial e a posição ( $x, y$ ) da superfície num instante  $t$ . Martin e Moyce (1952) e Hu e Sueyoshi (2010) também efectuaram estudos experimentais para quedas de coluna de água com as mesmas proporções.

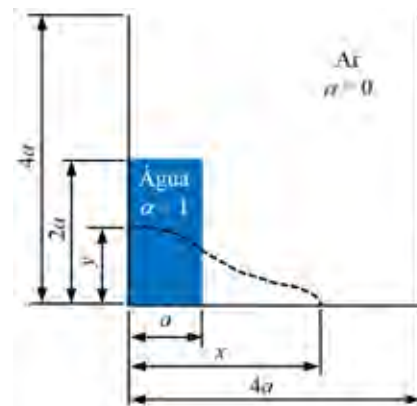


Fig. 1. Geometria do caso ( $a = 0.146$  m), condição inicial (coluna rectangular) e posição ( $x, y$ ) da superfície num instante  $t$ .



No presente trabalho foram utilizadas sete malhas ortogonais com diferentes refinamentos (Tab. I). Nesta tabela  $n_x = n_y$  são o número de volumes finitos em cada direção,  $\Delta x = \Delta y$  são as dimensões de cada volume finito e  $h_i/h_1$  é a razão de dimensões características dos volumes finitos da malha  $i$  em relação aos da malha mais refinada,  $i = 1$ .

Tab. I. Caracterização das malhas.

Malha	$n_x = n_y$	$\Delta x/a = \Delta y/a$	Volumes	$h_i/h_1$
DB1	80	0.05	6400	8
DB2	120	0.0333	14400	5.333
DB3	160	0.025	25600	4
DB4	240	0.0167	57600	2.667
DB5	320	0.0125	102400	2
DB6	480	0.00833	230400	1.333
DB7	640	0.00625	409600	1

As propriedades são consideradas a 20°C:  $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{ar}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ;  $\nu_{\text{água}} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\nu_{\text{ar}} = 1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ; e  $\sigma_{\text{ar-água}} = 0.073 \text{ N/m}$ .

Como ponto de partida para as condições de simulação considerou-se o exemplo *damBreak* (OpenFOAM v. 1712). Os esquemas de interpolação e discretização considerados são os mesmos que foram utilizados nesse caso (OpenCFD, 2018).

Nas paredes laterais e no fundo do domínio, aplicou-se a condição *slip* para a velocidade; a condição *fixedFluxPressure* para a pressão e a condição *zeroGradient* para a fração de volume. No topo do domínio, que se considera aberto para o exterior: a velocidade é calculada de acordo com a condição *pressureInletOutletVelocity*; é utilizada a condição de *totalPressure* para a pressão; e para a fração de volume é imposta a condição *inletOutlet*, em que tudo pode sair do domínio, mas só pode entrar ar.

Os campos de velocidade e de pressão são inicialmente nulos. A fração de volume está distribuída de forma a criar uma coluna de fluido, correspondente à água, com as dimensões  $a \times 2a$  indicadas na Fig. 1.

Como critério de paragem do processo iterativo, considerou-se uma diminuição de sete ordens de grandeza para a pressão, e de seis ordens de grandeza para a velocidade, face ao resíduo inicial. O passo de tempo da simulação foi controlado impondo que o número de Courant máximo no domínio não excedesse 1.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 2 comparam-se as soluções obtidas no presente trabalho com os resultados experimentais de Martin e Moyce (1952), Koshizuka *et al.* (1995) e Hu e Sueyoshi (2010). Apresenta-se a posição horizontal da superfície livre,  $x/a$ , na Fig. 2a) e a evolução do nível da superfície livre,  $y/(2a)$ , na Fig. 2b), em função do tempo. Para os resultados obtidos, a solução praticamente não varia com o refinamento da malha. Na Fig. 2a), as soluções obtidas diferem ligeiramente de alguns dados experimentais, no

entanto a forma da curva é semelhante. Hu e Sueyoshi (2010) demonstraram experimentalmente que este desvio se deve ao tempo que demora a abertura da parede que confina a coluna de líquido no instante inicial. Nas simulações do presente trabalho este evento ocorre instantaneamente no instante inicial. Na Fig. 2b), os resultados obtidos aderem bem aos dados experimentais, o que indica que o nível  $y$  não é influenciado significativamente pelo tempo de abertura da parede.

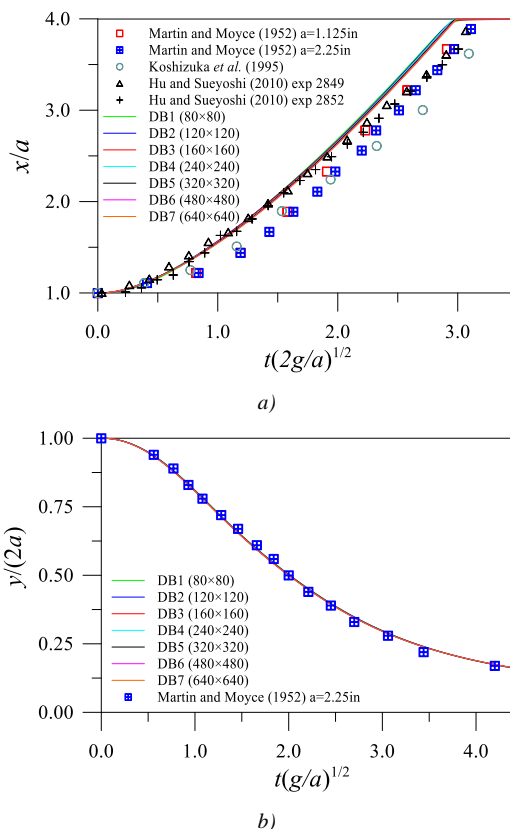


Fig. 2. Evolução temporal da posição da superfície livre.

Para avaliar a dependência da solução com o refinamento da malha foi selecionado o instante  $t = 0.15 \text{ s}$ . Na Fig. 3 apresentam-se as posições da frente de onda,  $x$ , e do nível da superfície livre,  $y$ , para os diferentes refinamentos da malha,  $h_i/h_1$ , onde  $h_i$  é a dimensão característica da malha e  $i = 1$  corresponde à malha mais refinada, DB7 (ver Tab. I).

A aplicação do método GCI aos valores da Fig. 3 permite obter os resultados apresentados na Tab. II.

Tab. II. Resultado da aplicação do método GCI.

$\phi$	$\alpha$	$p$	$\phi$	$U_1$
$x$	$1.97 \times 10^{-2}$	$1.53 \times 10^{-1}$	$3.18 \times 10^{-1}$	$3.2 \times 10^{-3}$
$y$	$2.40 \times 10^{-4}$	$8.71 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$3.3 \times 10^{-4}$

Constatou-se que ambas as curvas apresentam convergência monotónica e a ordem de convergência,  $p$ , é inferior a 1 para  $x$  e  $y$ . A incerteza para a malha mais refinada,  $U_1$ , é da ordem de  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$ , para  $x$  e  $y$ , respetivamente. Com os valores apresentados na

Tab. II foi possível representar as curvas de regressão e o valor da variável para a malha de dimensão infinitesimal,  $h_0 = 0$ .

Na Fig. 4 comparam-se as distribuições da fração de volume obtidas utilizando a malha DB7, com as fotografias dos ensaios experimentais de Koshizuka *et al.* (1995). Constata-se que a solução numérica acompanha relativamente bem os resultados experimentais até  $t = 0.4$  s. Do instante  $t = 0.6$  s em diante, a solução numérica começa a divergir dos resultados experimentais, uma das razões para isso é devido à superfície superior do domínio, que na simulação numérica não permite a reentrada de água, enquanto que no ensaio experimental parte da água que sai do domínio volta a entrar.

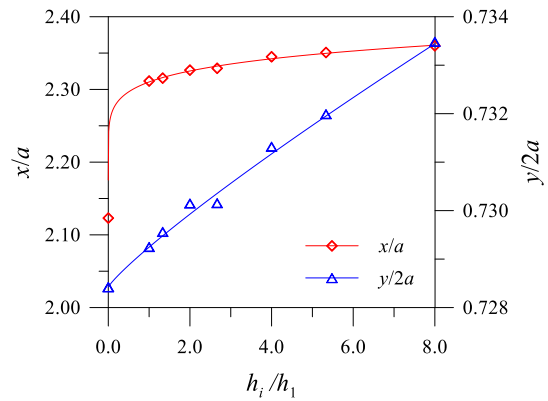


Fig. 3. Evolução da posição da superfície livre com o refinamento da malha para  $t = 0.15$  s.

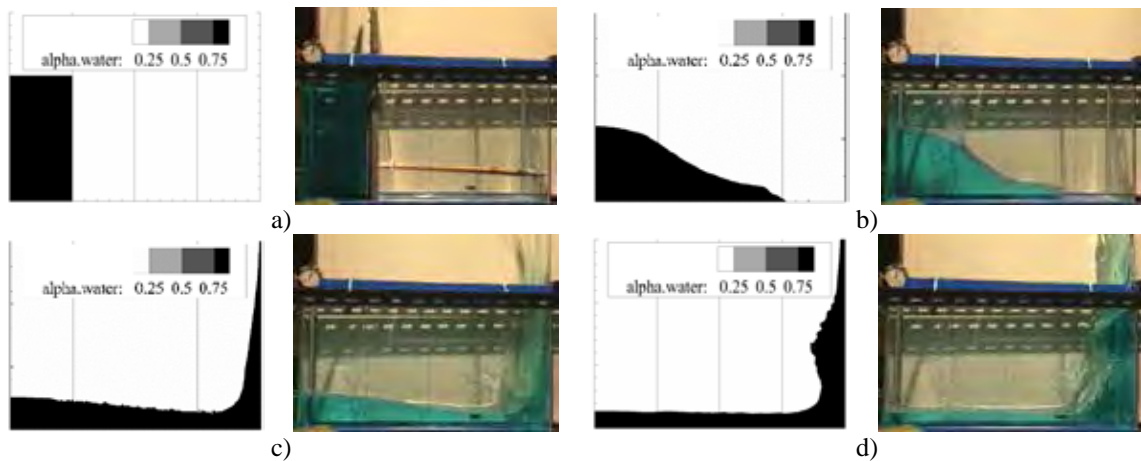


Fig. 4. Comparação da distribuição da fração de volume obtida utilizando a malha DB7 com fotografias do ensaio experimental realizado por Koshizuka *et al.* (1995): a)  $t = 0$  s; b)  $t = 0,2$  s; c)  $t = 0,4$  s; d)  $t = 0,6$  s.

## Agradecimentos

O autor agradece à Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial (UNIDEMI) e à Fundação Portuguesa para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio dado ao trabalho de investigação através do Projeto Estratégico UID/EMS/00667/2013.

## REFERÊNCIAS

- ASME (2009). *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, V&V20—2009*. American Society of Mechanical Engineers (ASME), USA. 100 pp.
- Eça, L. e Hoekstra, M. (2006). Discretization Uncertainty Estimation based on a Least Squares version of the Grid Convergence Index. In: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Workshop on CFD Uncertainty Analysis*. IST, Lisbon. 27 pp.
- Ferziger, J.H. e Peric, M. (2003). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 426 pp.
- Hu, C. e Sueyoshi, M.J. (2010). Numerical simulation and experiment on dam break problem. *Marine. Sci. Appl.*, 9 (2), 109-114.
- Jacobsen, N.G, Fuhrman, D.R. e Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 70, 1073-1088.
- Koshizuka, S., Tamako, H. e Oka Y., (1995). A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation. *Comput. Fluid Dynamics J.*, 4, 29-46.
- Martin, J.C. e Moyce, W.J. (1952). An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane. *Phil. Trans. Soc. London, A*, 244, 312-324.
- OpenCFD (2018). *OpenFOAM - The Open Source CFD Toolbox - User Guide (Version 1712)*. OpenCFD Limited. 164 pp.
- Roache, P.J. (2009). *Fundamentals of Verification and Validation*. Hermosa Publishers, Albuquerque, New Mexico, USA. 476 pp.

## Systematic Observation of Maritime Works. The New OSOM+

R. Capitão (1), R. Lemos (1), M.J. Henriques (1), C.J. Fortes (1), M. G. Neves (1), L.G. Silva (1)  
e M.T. Reis (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, rcapitao@lnec.pt.

**Abstract:** This paper presents recent new features of the Systematic Observation of Maritime Works (OSOM+) program, under development at LNEC since 1986, for using in an extensive number of maritime structures of mainland Portugal. Those functionalities are illustrated with applications to a real case scenario (the port of Ericeira) and by indicating their added-value on the existing methodology.

**Key words:** Systematic observation, maritime works, aerial surveys, VANT, drones.

### 1. INTRODUCTION

Breakwaters are common port and coastal protection structures. Their main goal is to reduce the wave action at the sheltered area of the structure to achieve safety conditions for people, ships and harbor activities. These maritime works, particularly rubble-mound breakwaters, are structures for which a certain risk is assumed in the design process. This is due to the degree of uncertainty associated with the loads these structures withstand, the characteristics of the materials used, the difficulties inherent to their construction and, finally, considering the harsh environment where they are deployed. Although this risk can be accepted, since a possible breakdown is not usually associated with the loss of human life, the material damages are generally quite high (Silva and Capitão, 2015).

Therefore, it is assumed that during the lifetime of a maritime structure, repairs will most likely be necessary whenever design conditions are exceeded. Also, maintenance works possibly have to be pursued whenever a certain state of fatigue of the elements and materials are attained. However, to effectively carry out these interventions, in a timely and cost-effective manner, it is imperative that the structures are observed in a systematic way throughout their lifetime. This enables to follow up their structural behavior and, through diagnosis analysis, to try to specify the most suitable (and less expensive) timespan to undertake any intervention.

Since 1986, the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) has developed a program for Systematic Observation of Maritime Works (OSOM) for the structures under the responsibility of the former Port and Maritime Transport Institute (IPTM), now under the jurisdiction of Docapesca - Portos e Lotas, SA, technically supported by the Directorate of Natural Resources, Safety and Maritime Services (DGRM). The objective of this program was (and is) to monitor the behavior of the structures and recommend timely interventions for their maintenance and/or repair.

The OSOM methodology is based on a series of systematic visual observation campaigns that provide the necessary information to feed a database (ANOSOM) meant to characterize the Current State, Evolution State and Risk State of the observed maritime structures. Based on this information, it is possible to establish when, where and under what circumstances maintenance and/or repair works should be carried out.

Recently, with the acquisition by LNEC of an unmanned aerial vehicle (UAV, or drone), a number of structural surveys have been carried out to complement the information obtained in above mentioned visual observation campaigns. The UAV provides more detailed and accurate information on the state of the structures. It also allows the assessment of the evolution of structures' envelopes, as well as the production of representative profiles of the more problematic zones of such structures.

On the other hand, the migration of the existing ANOSOM database to a GIS-based online platform was carried out. A mobile app was also developed in order to better assist the visual campaigns while also giving online access to all the information related to each maritime structure. All these new capabilities are now part of the so-called OSOM+.

The OSOM program and the new OSOM+ methodologies are described in the following sections.

### 2. THE OSOM PROGRAM

The OSOM program is based on: a) periodic visual inspections of the structures, supported by photographs and films; b) a diagnosis analysis of each section of the structures (Current State, Evolution State and Risk State); c) a prioritization list of interventions to be done in all structures included in the program, either of maintenance nature or of repair; d) other additional inspection measures (e.g., hydrographic surveys).

A database (ANOSOM) was developed for the existing OSOM program (Reis and Silva, 1995; Santos *et al.*, 2003). It allows: a) the storage, query and analysis of

the information collected on the different breakwaters and, in particular, the data from the visual observation campaigns or other information (e.g. surveys of the emerged and submerged parts of the structure); b) the diagnosis of the structure, i.e., it processes the Current State, the Evolution State (corresponding to the degree of evolution for a certain period of time) and also the Risk State (associated to the lack of intervention) for each breakwater section. This is done through the application of pre-specified criteria properly calibrated. This is therefore a fully developed methodology, duly consolidated since 1986.

Besides the structures along the Portuguese mainland coast, the OSOM program (and the ANOSOM application) has been applied to the Azores archipelago (Silva, 2010), to Macau's airport maritime structures (Reis *et al.*, 2001) and to several structures on Moroccan ports (Lemos *et al.*, 2014).

### 3. THE NEW OSOM+

This systematic observation of maritime works has, however, undergone a recent evolution and now it includes the following new functionalities:

- A more accurate visual inspection of breakwaters with GPS-tagging systematic photographs;
- Inspection through aerial photography using a drone;
- A new GIS interface for the ANOSOM database (ANOSOM\_SIG) with online querying of information for each section of the breakwater;
- The use of a portable application for real-time input and visualization of the database information obtained during monitoring campaigns.

The next sections detail on these new functionalities.

#### 3.1. Accurate visual inspection of breakwaters using GPS-tagging

Visual inspection based on photographs allows, in a fast and intuitive way, to follow the behavior of the structures. It also allows, through subsequent analysis and data diagnosis, to infer on the evolution of possible damages on the observed structure and on the likely need for interventions, thus preventing future structural problems.

In OSOM+, the observed breakwaters are, as before, subject to systematic recording of photographs and video at specific points of the structure. In this case, however, the systematic photography has to guarantee exact positioning at predefined locations and directions, through GPS-tagging, see Figure 1. In addition, 360° handheld videos are now made for points that, during the course of the campaign, are considered relevant to better illustrate and characterize the behavior and Current State of the observed structure.



Fig. 1. Systematic photographs taken at predefined point 6 of Ericeira's breakwater, according to two predefined directions (northeast-left and southwest-right).

#### 3.2 Aerial inspection with UAV

OSOM+ includes the use of UAV, which allows aerial photographic surveys of the marine structures under inspection, Figure 2. This complements the information obtained in visual observation campaigns and provides substantially more detailed information of the structure, mainly by covering hidden perspectives from a human observer walking on the structure. The results of these aerial observation campaigns are the individual aerial photographs of each structure, captured in a regular pattern and in the vertical direction (zenith), as well as the respective orthophotos (i.e., geometrically corrected, or orthorectified, images) and numerical surface models of the structure. Recently, during a campaign on April 24, 2018, an aerial photographic survey of the Ericeira's breakwater was carried out. Based on aerial photographs of the structure, an orthophoto and point clouds were produced, Figures 2 and 3.



Fig. 2. Orthophoto of Ericeira's breakwater, obtained after a drone campaign, on April 24, 2018, with details of the areas of the trunk and head, at the indicated points, at a height of 60 m.

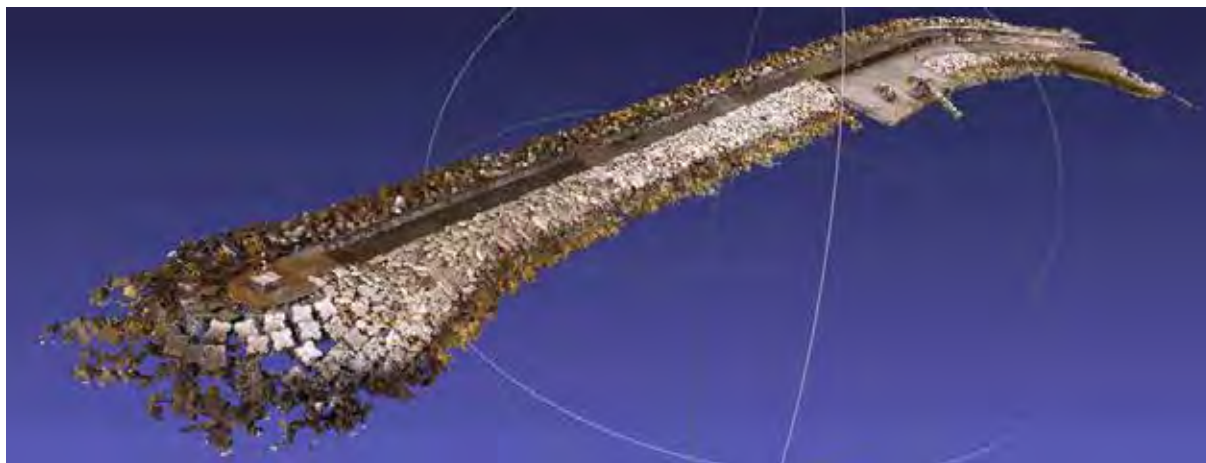


Fig. 3. Point cloud of Ericeira's breakwater, obtained after the drone campaign of April 24, 2018.

Subsequently, the surface model was extracted and profiles were compared to those obtained at an earlier aerial campaign (of 2013) to compute differences between clouds, Figure 4, and also to obtain damage evolution, if existing.

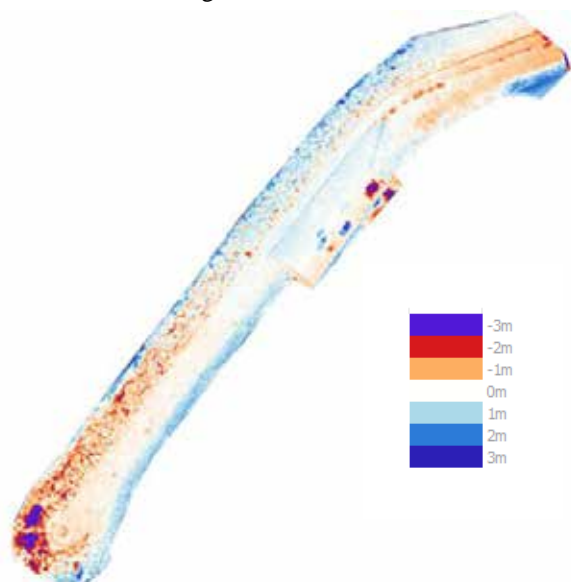


Fig. 4. Comparison of point clouds (with differences coded in colors) of Ericeira's breakwater between 2013 and 2018.

For the calibration of the obtained models, it is necessary to obtain data pertaining to specific positions on the structure, by using high-resolution positioning equipment (a pair of GNSS antennas to coordinate points by RTK). In this case, the selected points were located in the superstructure (crown wall).

This new feature clearly allows a relevant leap in the observation program, namely by enabling the comparison between digital surface models, generated from the point clouds resulting from aerial surveys in different years (Figure 4), thus allowing visualization of erosion zones, by getting comparative profiles at more vulnerable points of the structure, and by rendering it possible to accurately quantify areas and eroded volumes.

### 3.3. The ANOSOM\_SIG GIS database

A recent update of the ANOSOM database (now called ANOSOM\_SIG) allows the assessment of information projected in the base map, grouped by layers (Figure 5). By selecting a layer and a corresponding section, it is now possible to check the information related to each section.



Fig. 5. A search operation in the ANOSOM\_SIG interface for Ericeira's breakwater.

Now, the structure of the new database includes modules (Lemos *et al.*, 2016), corresponding to the storage and querying of information on the different sections in which the structure is divided into, such as: historical data, physical characterization and data obtained during the field campaigns (drone surveys, photographs and visual observation data). The database, which initially is only fed with information related to the structure's project design (project drawings, existing hydrographic surveys, underwater inspections, aerial photographs, historical data, etc.), is subsequently fed with information collected in the different observation campaigns and whenever changes resulting from relevant interventions on the structure are noted.

### 3.4. Mobile application

A computer tool (Maia, 2016; Maia *et al.*, 2017) was also developed for mobile devices to be used during and after observation campaigns. This WebGIS (multiplatform) mobile application allows (Figure 6):

- The filling-in and real-time upload of the observational information during campaigns;
- The checking, during campaigns, of the structure's information from previous campaigns, namely:
  - The location of the observational points and characteristics of the associated photographs and videos (framing and direction);
  - The related photographs and video;
  - The information on the physical characteristics of the breakwater sections and their components;
  - The Current, Evolution and Risk States, if existing.



Fig. 6. Photographs of Ericeira's breakwater uploaded to server using the WebGIS app.

The information collected during the visual campaigns (photographs, videos, and other data, such as damage information) is immediately uploaded to the server and viewed on the device on the spot. The WebGIS application allows the calculation of the Current State of the structure in real time. The user can thus access, *in situ*, the Current, Evolution and Risk States of the structure (if existing) and assess whether or not the structure needs repair or immediate maintenance works. The developed tool has clearly increased productivity and efficiency in the inspections made so far. However, this system can only operate when good meteorological conditions exist, as the wind and waves may harm these mobile devices. Furthermore, these devices should be operated only when the safety of the observer is not at stake, as their maneuvering may, for example, hinder equilibrium on top of armor blocks.

#### 4. FINAL REMARKS

The new features of OSOM+ described in this paper clearly contribute to a better and more efficient program of systematic observation of maritime works.

Periodic visual observation campaigns complemented with drone observations allow a sounder determination of the Current, Evolution and Risk States of the structures and a more complete feeding of the ANOSOM\_SIG database.

During campaigns, the use of the WebGIS mobile application *in situ* also streamlines the process.

In the end, both the provider of this information (LNEC) and the end-users (Docapesca, DGRM, Port Authority Administrations, etc.) benefit from a more accurate information on the state of the structures in a predominantly quantitative nature, which complements the already existing detailed qualitative information obtained in the visual observation campaigns.

#### Acknowledgements

The authors wish to thank Dr. Alexandre Maia and Prof. Armanda Rodrigues, for the development of the WebGIS mobile application, within the scope of Dr. Maia's master's thesis in the Faculty of Sciences and Technologies of the New University of Lisbon. Thanks are also due to Hugo Silva, drone operator from LNEC, for his piloting during the aerial observation campaign at the port of Ericeira.

#### REFERENCES

- Lemos, R.; Silva, L.G. and Fortes, C.J.E.M. (2014). *Port de Nador. Base de Données ANOSOM\_NADOR. Manuel d'Utilisation.* Report DHA/NPE, LNEC, Lisbon.
- Lemos, R.; Silva, J.; Fortes, C.J.E.M.; Reis, M.T. and Lopes, P. (2016). A aplicação ANOSOM\_SIG como ferramenta de gestão de risco em estruturas de proteção costeira e portuária. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisbon, 21-23 June 2016.
- Maia, A. (2016). *Plataforma para Análise de Estruturas Costeiras.* MSc. Dissertation, Informatics Department, Faculty of Science and Technology, New University of Lisbon, Caparica, Portugal. <https://run.unl.pt/handle/10362/19959>.
- Maia, A.; Rodrigues, A.; Lemos, R.; Capitão, R. and Fortes, C.J.E.M. (2017). A Web platform for the systematic monitoring of coastal structures. In *GISTAM 2017*, Porto, pp. 102-111.
- Reis, M.T. and Silva, L.G. (1995). *Systematic Observation of Maritime Works. ANOSOM Database: User's Manual.* Report DHA/NPE, LNEC, Lisbon.
- Reis, M.T.; Lemos, R. and Silva, L.G. (2001). *Monitoring the Coastal Structures of Macau International Airport. ANOSOM: A Structure Behaviour Database – User's Manual.* Report 227/01 – DH/NPP, LNEC, Lisbon.
- Santos, J.A.; Neves, M.G. and Silva, L.G. (2003). Rubble-mound breakwater inspection in Portugal. In *Proc. Coastal Structures '03*, Melby, J.F. (Ed.), Portland, ASCE, pp. 249-261.
- Silva, L.G. (2010). *OSOM. Plano para Implementação de um Projecto na Região Autónoma dos Açores.* Report 403/2010 - DHA/NPE, LNEC, Lisbon.
- Silva, L.G. and Capitão, R. (2015). *OSOM. Estruturas Marítimas da Costa Oeste de Portugal Continental. Campanhas de Observação Visual Efetuadas em 2015.* Report 369/2015 - DHA/NPE, LNEC, Lisbon.

## Influence of wave conditions in damages at scale model tests of rubble-mound breakwaters under sea level rising

**R. Lemos (1), M.G. Neves (1), C.J.E.M. Fortes (1), A. Mendonça (1), A. Ramos (1), R. Capitão (1), M.T. Reis (1)**

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), rlemos@lnec.pt

**Abstract:** Usually, physical model tests support the design of breakwaters considering different incident wave conditions, including extreme events. This paper describes two-dimensional physical model tests of a rock armour breakwater, performed at LNEC's experimental facilities, under the framework of the HYDRALAB+ project. The goal of the present work is to evaluate damage evolution under wave conditions resulting from future climate change scenarios. Test results are presented in terms of the non-dimensional damage parameter (S) and of the percentage of displaced armour units (D). The data analysis is focused on the cumulative damage progression related with wave parameters as  $H_{\max}$  and  $H_{2\%}$ , for the imposed storm sequences. The use of the stability number (Ns), considering both  $H=H_s$  and  $H=H_{2\%}$  revealed a good agreement in order to characterize its relationship with damage evolution. On the other hand, the use of  $H_{\max}$  revealed a decrease of the linearity on damage evolution.

**Key words:** Physical model, Damage evolution, Climate change, Storm sequences

### 1. INTRODUCTION

In the presence of climate change predictions, a large number of structures will need upgrading, in order to reduce the risk of future damages. Understanding damage progression under future climate change scenarios is of utmost importance for effective management of coastal defences.

Cumulative effects due to storm sequences could lead to progressive failures, due to, for instance, armour instability and related overtopping of the structures. Therefore, a correct description of storm evolution is deemed fundamental for analysing damage progression as well as its impact on wave overtopping, HYDRALAB+ (2017).

The aim of this work is to evaluate, on two-dimensional (2D) physical model tests, the damage evolution of a cross-section of a rubble-mound breakwater, under three different approaches of storm sequences. Measuring equipment was deployed in the flume to evaluate the free-surface elevation in different positions, the wave run-up and the overtopping over the structure.

Concerning damage evaluation, two techniques were used: visual observation (counting) of displaced units and a stereo-photogrammetric technique. With the results of these techniques, it was possible to evaluate the percentage of displaced armour units (D) and the non-dimensional damage parameter  $S=Ae/(Dn_{50})^2$ , where Ae is the eroded cross-sectional area around the still water level and  $Dn_{50}$  is the nominal diameter of the armour units. The present work aimed to analyse the relationship between the stability number, Ns, and the wave steepness,  $S_{0p}$ .

Furthermore, the relationship between damage parameters (D and S) and the stability number, Ns was also evaluated.  $Ns=H/(\Delta \cdot Dn_{50})$  is normally used to characterize hydraulic stability, where  $\Delta=(\rho_r-\rho_w)/\rho_w$  is the relative submerged mass density,  $\rho_r$  is the mass density of the rock,  $\rho_w$  is the mass density of the sea water and H is a characteristic wave height. To infer on the best wave parameter to establish this relationship, Ns was estimated considering three different wave heights: the significant height  $H=H_s$  ( $Ns_{,Hs}$ ), the maximum height  $H=H_{\max}$  ( $Ns_{,H\max}$ ) and the height exceeded by only 2% of the waves in a record  $H=H_{2\%}$  ( $Ns_{,H2\%}$ ).

### 2. METHODOLOGY

#### 2.1 Physical Model Tests

2D physical model tests were conducted at the Ports and Maritime Structures Unit (NPE) of the Hydraulics and Environment Department, in a wave flume (COI 1) approximately 50 m long, with an operating width and an operating water depth of 80 cm each. The flume is equipped with a piston-type wavemaker embedding an active wave absorption system, AWASYS (Troch, 2005) for the dynamic absorption of reflected waves. The tested model was a double-layer, randomly placed rubble-mound breakwater with a porosity of ~37% and a 1:2 slope. The armour unit nominal diameter ( $Dn_{50}$ ) was 4.45 cm, with a mass density of 2.6 g/cm<sup>3</sup>.

The physical model was built and operated according to Froude's similarity law, with a geometrical scale of 1:30, as to ensure reduced scale effects (wave heights should lead to values of the Reynolds number,  $Re > 3 \times 10^4$ ). The foreshore slope was 2% and the flume was equipped with twelve

resistive-type wave gauges deployed along its length, to measure the free-surface elevation at different locations. The equipment used to collect the volume of water that overtopped the structure

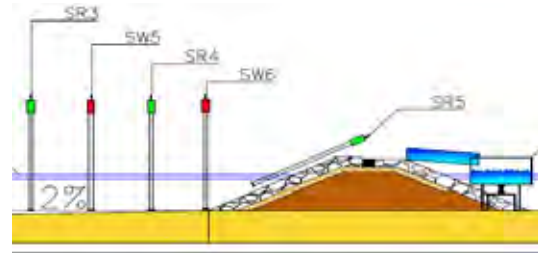


Fig. 1. Model of the breakwater cross-section and experimental equipment setup nearby the structure.

Table I summarizes the test characteristics for the three test approaches: Approach A simulates increasing significant wave heights ( $H_s$ ) with increasing peak periods ( $T_p$ ) and water depths; Approach B simulates a constant wave period, alternating water depths and increasing wave heights; Approach C simulates, for two water

depths, a standard storm build-up, with a constant peak period. In all approaches, irregular wave tests were conducted for water levels and significant wave heights corresponding to extreme events, associated to climate change scenarios, represented by a severe sea level rise (SLR), with a cumulative effect of meteorological adverse conditions.

Table I. Test conditions at the structure toe (model scale).

Approach A				Approach B				Approach C			
Test	Water depth (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Test	Water depth (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Test	Water depth (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)
1	0.30	1.83	0.11	8	0.37	2.19	0.12	9	0.27	2.19	0.12
2	0.30	1.83	0.12	9	0.27	2.19	0.12	11	0.27	2.19	0.14
3	0.30	1.83	0.14	10	0.37	2.19	0.14	13	0.27	2.19	0.16
4	0.34	2.01	0.12	11	0.27	2.19	0.14	15	0.27	2.19	0.17
5	0.34	2.01	0.14	12	0.37	2.19	0.16	8	0.37	2.19	0.12
6	0.34	2.01	0.16	13	0.27	2.19	0.16	10	0.37	2.19	0.14
7	0.34	2.01	0.17	14	0.37	2.19	0.17	12	0.37	2.19	0.16
				15	0.27	2.19	0.17	14	0.37	2.19	0.17

## 2.2 Damage Analysis

Damage was characterized by two methods: counting the number of displaced units (D) over the total number of blocks on the active zone; and measuring the eroded area at the active zone of the armour (approximately,  $7Dn_{50}$  around the still water level) by dividing the eroded volume by the length of the cross-section. Broderick (1983) and Van der Meer (1988) defined a dimensionless damage parameter,  $S=Ae/(Dn_{50})^2$ , where  $Ae$  is the eroded cross-sectional area around the still water level and  $Dn_{50}$  is the nominal diameter of the armour units.

Results are presented in terms of the evolution of the non-dimensional damage parameter (S) and of the percentage of displaced armour units (D) with the stability number,  $N_{s,H}=H/\Delta Dn_{50}$ , considering  $H=H_s$ ,  $H=H_{2\%}$  and  $H=H_{max}$ . Only approaches B and C, comprising a representative sample of increasing wave heights, were considered to relate S with  $N_s$ .

Table II and Table III show the percentage of

displaced armour units (D) and the non-dimensional damage parameter (S) computed for each storm sequence, respectively. Due to problems related with photograph acquisition (it was not possible to determine  $Ae$ ), results from test T1, for storm sequence A, and T13, for storm sequence B, are not presented. Storm C, under sea level rise conditions with increasing significant wave heights, presented the highest values of cumulative damage for both D and S parameters.

The non-dimensional damage parameter (S) at the end of storm sequences A, B and C, according to the damage classification proposed by Van de Meer (1988) for a 1:2 rock slope, corresponds to intermediate damage at the end of all sequences.

Since damage is a function of the stability number,  $N_s$ , which is a function of the wave steepness,  $S_{0p}=2\pi H/(gT_p^2)$ , the trend of  $N_s$  related with  $S_{0p}$  was also estimated considering H equal to  $H_s$  and  $H_{2\%}$ . These values were calculated based upon the data collected at the wave gauge located at the toe of the



structure (SW6), at a seaward distance of 0.15 m from the structure toe.

Figure 2 illustrates, for test sequences A, B and C, the stability number,  $N_s$ , obtained in the scale model tests (including both initial and intermediate damage

stages), as a function of  $S_{0p}$  when considering  $H=H_s$  and  $H=H_{2\%}$ . The obtained values of  $N_s$ , respectively  $N_{s,H_s}=1.75$  and  $N_{s,H_{2\%}}=2.50$ , are in accordance with the presented in Herrera *et al.* (2017).

Table II. Percentage of displaced armour units (D) for each storm sequence.

Storm	Test	1	2	3	4	5	6	7	
Storm A	D (%)	3.2	4.0	4.8	5.6	7.3	9.7	10.5	
	Test	8	9	10	11	12	13	14	15
Storm B	D (%)	4.0	4.8	6.5	6.5	7.3	8.9	10.5	11.3
	Test	9	11	13	15	8	10	12	14
Storm C	D (%)	3.2	3.2	4.0	9.7	11.3	14.5	14.5	16.1

Table III. Damage parameter (S) computed for each storm sequence

Storm	Test	1	2	3	4	5	6	7	
Storm A	S	-	1.21	1.07	2.02	1.92	4.20	3.44	
	Test	8	9	10	11	12	13	14	15
Storm B	S	3.08	0.88	1.17	2.01	2.55	-	3.71	2.21
	Test	9	11	13	15	8	10	12	14
Storm C	S	2.22	1.57	1.62	3.81	3.49	3.85	3.98	5.16

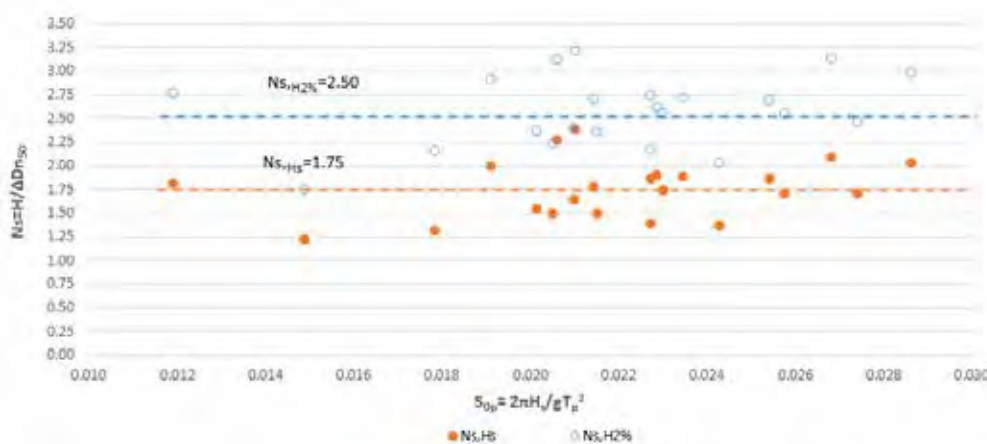


Fig.2. Stability number,  $N_s$ , obtained in the scale model tests for intermediate damage when considering  $H=H_s$  and  $H=H_{2\%}$

Figure 3 depicts the percentage of displaced armour units,  $D$ , as a function of the stability number,  $N_s$ , for storm sequence B (increasing wave heights with alternating water depths, with SLR), considering  $H=H_s$ ,  $H=H_{2\%}$  and  $H=H_{max}$ . It shows that  $N_{s,H_s}$  exhibits a quasi-linear trend, whereas no linear trend is found for  $N_{s,H_{max}}$ .  $N_{s,H_{2\%}}$  presents an intermediate case. The relationship between  $D$  and  $N_s$  can be defined as  $D=aN_s^b$ , with  $0.35 < a < 2.19$  and  $2.5 < b < 3.3$ . Also for storm sequence B, Figure 4 shows the non-dimensional damage parameter  $S$  as a function of  $N_{s,H_s}$  and of  $N_{s,H_{2\%}}$ . In this case, when using  $N_{s,H_{2\%}}$ , a 6-power relationship between  $S$  and  $N_s$  is found, in accordance with the results of Herrera *et al.* (2017).

Regarding storm sequence C, Figure 5 presents the relationship between  $S$  and  $N_s$ , for tests with two water depths (one of them considering SLR), each one comprising increasing wave heights. It shows that for LWL and SLR,  $S$  has a similar relationship with  $N_{s,H_s}$ ,  $N_{s,H_{2\%}}$  and  $N_{s,H_{max}}$ . Storm sequence C presents higher values of cumulative damage  $S$  than the other sequences. Nevertheless, for the highest wave heights with SLR, damage decreases with increasing overtopping rates,  $Q$ , Figure 6. This

decrease is also associated to accretion on the active zone, due to removed armour units from the crest zone.

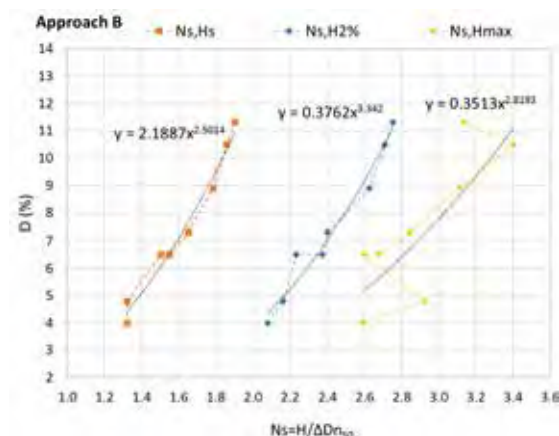


Fig.3. Approach B. Percentage of displaced armour units,  $D$ , versus the stability number,  $N_s$ .

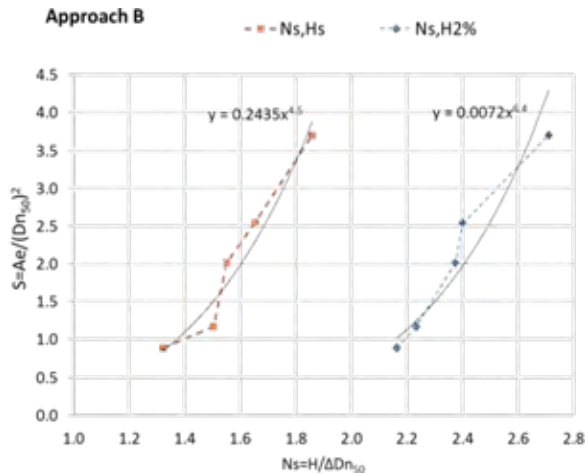


Fig. 4. Approach B. Non-dimensional damage parameter,  $S$ , versus  $N_{s,H_s}$  and  $N_{s,H_{2\%}}$

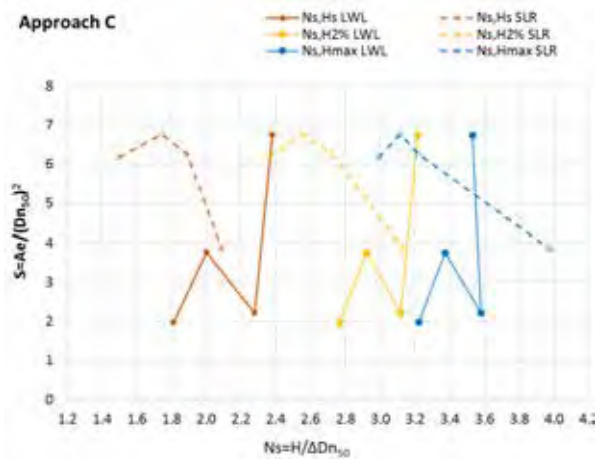


Fig. 5. Approach C. Non-dimensional damage parameter,  $S$ , versus  $N_{s,H_s}$ ,  $N_{s,H_{2\%}}$  and  $N_{s,H_{max}}$  for LWL and SLR.

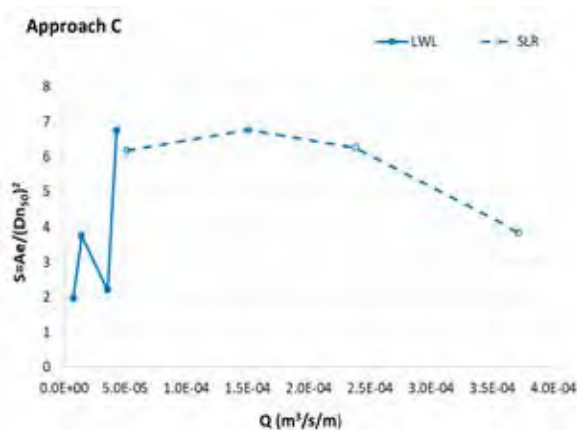


Fig. 6. Approach C. Non-dimensional damage parameter,  $S$ , versus overtopping rates,  $Q$ .

### 3. CONCLUSIONS

This study analyses the hydraulic stability of an armour layer composed of rock armour units, under three different storm sequences, two of them comprising sea level rise. It is based on physical model tests conducted in one of LNEC's wave flumes, at a reference scale of 1:30. The tested

armour layer has a 1/2 slope and a double layer with a porosity of ~37%. A 2% foreshore was used.

Wave conditions comprised three different storm sequences, A, B and C, with significant wave heights at the toe of the structure ( $H_s$ ) between 0.11 m and 0.17 m and peak periods ( $T_p$ ) of 1.83 s and 2.19 s. The wave steepness ( $S_{op}$ ) ranged between 0.012 and 0.029. The water depths at the toe of the structure were 0.27 m, 0.30 m, 0.34 m and 0.37 m.

Storm sequence C, under sea level rise conditions and with increasing significant wave heights, has shown the highest values of cumulative damage for both the percentage of displaced armour units ( $D$ ) and the non-dimensional damage parameter ( $S$ ). However, highest wave heights associated with SLR led to a decrease of damage, both for Approaches B and C, due to increase in wave overtopping.

The use of the stability number ( $N_s$ ), considering both  $H=H_s$  and  $H=H_{2\%}$  at the toe of the model, revealed that damage increases with the stability number. On the other hand, with the use of  $H_{max}$  the relationship between damage evolution and  $N_s$  is not evident.

Concerning the alternated increase/decrease of  $S$  due to erosion/accretion phenomena, a larger test sample should be used in order to achieve a more accurate relationship between  $S$  and  $N_s$ .

Future works should also comprise the study of damage at the rear side of rubble-mound breakwaters under similar water levels and wave conditions, due to increase in overtopping rates.

### Acknowledgements

This work was carried out under the framework of H2020 project HYDRALAB+ Adaptation for Climate Change, EC contract no 654110.

### REFERENCES

- Broderick, L.L. (1983). Riprap stability, a progress report. *Proc. Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers*, 320- 330.
- Herrera, M., Gómez-Martín, E., Medina, J. (2017). Hydraulic stability of rock armors in breaking wave conditions. *Coastal Engineering*, 127 (2017), 55-67.
- HYDRALAB+ (2017). *Deliverable: Task 8.1 Critical Review of Challenges for Representing Climate Change in Physical Models*. Report of HYDRALAB+ project - EC contract no 654110.
- Troch, P. (2005). *User Manual: Active Wave Absorption System*. Ghent University, Dep. Civil Engineering, Belgium.
- Van der Meer, J.W. (1988). *Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands (also Delft Hydraulics Publ. 396).

## Estudos de Agitação e Ressonância no Porto de Leixões

C.J.E.M. Fortes (1), M. G. Neves (1), L. V. Pinheiro (1), R. Capitão (1), H. Lopes (2)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt)

(2) APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A.

**Resumo:** Com vista a otimizar a geometria do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, bem como avaliar os impactes desse prolongamento nas condições de agitação na praia de Matosinhos, efetuou-se a caracterização da agitação marítima na zona de estudo, considerando várias soluções alternativas para o quebra-mar. A presente comunicação descreve os estudos realizados em modelo numérico para: a) o estabelecimento de regimes de agitação no exterior do porto, b) a caracterização da agitação e ressonância no interior do porto; c) a avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar nas condições de agitação da praia de Matosinhos.

**Palavras-chave:** Porto de Leixões, Agitação marítima, Ressonância, Modelação numérica

### 1. INTRODUÇÃO

O Porto de Leixões, localizado na costa norte de Portugal, é um dos maiores do país, recebendo diariamente um grande número de navios de grandes dimensões. O crescimento económico que se perspetiva a nível mundial leva a antecipar que o número de navios e a sua dimensão continuarão a aumentar nos próximos anos.

Nesse sentido, a APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. (APDL) pretende prolongar o seu quebra-mar principal (exterior) bem como promover o aprofundamento e alargamento do canal de acesso da bacia de rotação do porto de modo a criar as condições de abrigo e segurança necessárias para permitir a receção no porto de Leixões de navios com 300 m de comprimento, 40 m de boca e 13.5 m de calado.

No âmbito dos vários tipos estudos que foram efetuados de apoio à elaboração do Projeto de Execução (PE) e ao Estudo de Impacto Ambiental (EIA), APDL (2016), relativos ao projeto de prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas ao Porto de Leixões, o LNEC efetuou um conjunto de estudos em modelo numérico com vista à análise de diferentes alternativas do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, bem como à avaliação dos impactes desse prolongamento nas condições de agitação na praia de Matosinhos.

Assim, os estudos do LNEC avaliaram o abrigo à agitação de curto período no canal de acesso e no interior do porto e ainda as condições de agitação na proximidade da praia de Matosinhos para diferentes condições de agitação marítima à entrada do porto. Por outro lado, avaliou-se a resposta da bacia a ondas de longo período. Nos estudos efetuados consideraram-se sete configurações do porto: a Situação Atual (designada por S0, que considera a

configuração atual da barra e do canal de acesso) e seis alternativas de prolongamento do molhe (designada por S1 a S6), Fig. 1, correspondentes a: S1- 300 m de extensão, com um ângulo de abertura de 20°; S2 - 250 m de extensão, com um ângulo de abertura de 20°; S3- 200 m de extensão, com um ângulo de abertura de 20°; S4- 300 m de extensão, com um ângulo de abertura de 0°; S5 - 250 m de extensão, com um ângulo de abertura de 0°; S6- 200 m de extensão, com um ângulo de abertura de 0°.

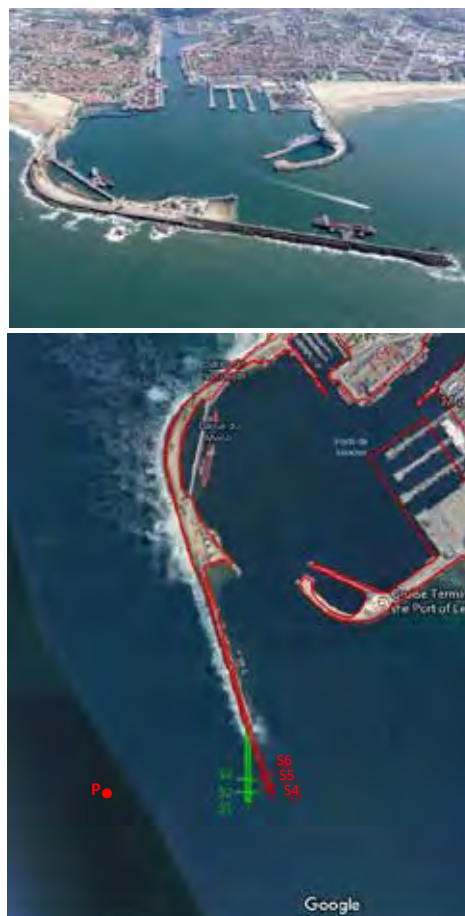


Fig. 1. Porto de Leixões. Configurações portuárias.

Considerou-se em todos os casos a dragagem do canal de acesso à cota -16.85 m (ZHL) e da bacia de rotação à cota -15.5 m (ZHL), sendo ZHL o Zero Hidrográfico no porto de Leixões.

Nas próximas secções descrevem-se os estudos realizados de caracterização: da agitação na entrada do porto, de agitação e ressonância no interior do porto e de agitação na praia de Matosinhos para as diferentes configurações do porto.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO NA ENTRADA DO PORTO

A rosa de direcções e o histograma HS-TZ associado ao regime de agitação marítima, Capitão *et al.* (2017), na entrada do porto de Leixões, i.e., no ponto P, de coordenadas 41° 10' 5.70" N, 8° 42' 51.59" W, são apresentados na Fig. 2. Este regime foi obtido por transferência, desde o largo, de estimativas do modelo de *hindcast* WAM do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF), para cerca de 38 anos (1979-2016).

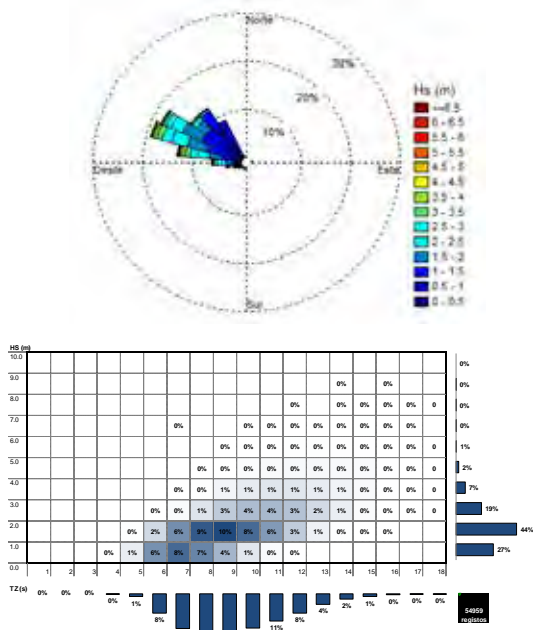


Fig. 2. Rosa de direcções e histograma HS-TZ no ponto P.

Este regime caracteriza-se por:

- Alturas significativas, HS, entre 0.0 m e 8.98 m, sendo a média de 1.63 m. A maioria dos valores encontra-se entre as gamas de 0.0 a 4.0 m (97%), e a gama mais frequente é entre 1.0 e 2.0 m (44%);
- Períodos médios de onda, TZ, entre 3.9 s e 17.3 s, com média igual a 8.7 s. A maioria dos valores encontra-se nas gamas entre 5 s e 12 s (90%), sendo as gamas com maior frequência entre 6 s e 11 s (74%);
- Direcções médias de onda, DIR, dentro da gama 182° a 342°, sendo o valor médio de 295°. A maioria dos valores de direcções verifica-se nas gamas entre 270° e 337.5° (89%).

## 3. ESTUDOS DE AGITAÇÃO E RESSONÂNCIA NO PORTO

O objetivo dos estudos de agitação e ressonância foi avaliar comparativamente o abrigo obtido no interior do porto e no canal de acesso ao anteporto, para as diferentes configurações portuárias (S0 a S6). O estudo foi realizado para ondas curtas e ondas longas, Pinheiro *et al.* (2017a,b). A análise foi efetuada para os pontos do canal de acesso e do interior do porto, Fig. 3.

### 3.1 Estudos de agitação

Com base no regime de agitação marítima estabelecido no ponto P, definiu-se uma gama de trios de ondas regulares (H, T, DIR) e de níveis de maré (NM) que englobam todos os estados de mar de que há registo no período total de dados, de 1 de janeiro de 1979 e 31 de agosto de 2016 (regime geral no ponto P, Fig. 2). Para cada trio, efetuaram-se os cálculos com o modelo DREAMS, Fortes (1993), considerando cada uma das configurações portuárias seleccionadas (S0 a S6).

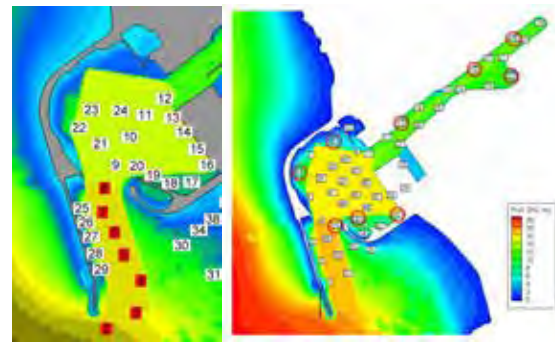


Fig. 3. Pontos de análise a) no estudo de agitação (esquerda) e b) no estudo de ressonância (direita).

Foram assim construídas matrizes de transferência, que relacionam as características de agitação no exterior (ponto P) com as correspondentes características em 29 pontos de controlo, Fig. 3. Com base nessas matrizes, transfere-se o regime de agitação do ponto P para cada um desses pontos de controlo, definindo-se em cada um deles o regime de agitação marítimo observado, Pinheiro *et al.* (2017a).

De modo a avaliar, comparativamente, o abrigo concedido por cada configuração, contabilizou-se o número médio de dias em que as alturas significativas são superiores aos valores-limite de 0.5, 1 e 2 m, Fig. 4. Foram excluídos os dias em que a altura significativa, no exterior do porto, é superior a 4 m, pois nessas condições ocorre limitação à entrada e saída de embarcações mais pequenas no porto.

Os resultados do estudo permitiram concluir que o prolongamento do molhe conduz a um maior abrigo do canal de navegação. Com efeito, as configurações correspondentes ao prolongamento do molhe (S1 a S6) conduzem a um menor número de dias com  $HS > 1.0$  m nos pontos de controlo localizados ao longo do canal de navegação (P2 a P8).

O número de dias com alturas de onda nas diferentes classes analisadas aumenta com a diminuição do comprimento do molhe (de S1 para S3 e de S4 para S6), mas reduz-se relativamente à situação atual. As configurações S4 e S1 são as que conduzem ao maior abrigo nos pontos P3 a P8 (com diferenças pouco significativas entre eles). No ponto P2, é a configuração S1 que corresponde ao maior abrigo.

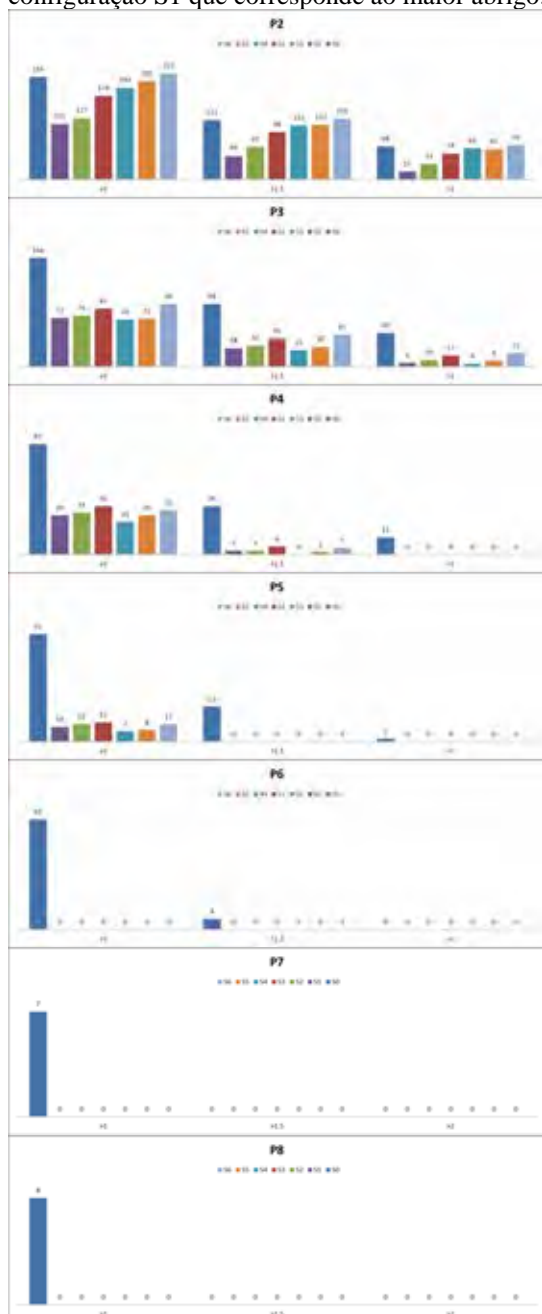


Fig. 4. P2 a P8. N.º médio de dias com  $HS > 1.0, 1.5$  e  $2.0$  m, excluindo estados de agitação superiores a  $4$  m no exterior.

### 3.2 Estudos de ressonância

Os estudos de ressonância, Pinheiro *et al.* (2017b), analisaram a resposta do porto de Leixões à incidência de ondas longas, para cada uma das configurações testadas.

Os cálculos com o modelo DREAMS foram efetuados para as seguintes condições de agitação

regular: a) períodos de onda,  $T$ , de  $20$  s a  $700$  s com intervalo de  $20$  s; b) direções de onda à entrada do domínio de cálculo de  $180^\circ$  a  $360^\circ$ , com intervalo de  $22.5^\circ$ ; c) nível de maré de  $+0.5$  m (ZHL) a  $+4.0$  m (ZHL), com intervalo de  $0.5$  m.

Os resultados obtidos (curvas de resposta em diversos pontos de controlo e diagramas de amplificação na totalidade do domínio de cálculo), para as oito configurações portuárias (S0 a S6) permitem avaliar as consequências, em termos de coeficientes de amplificação e velocidade, que cada configuração poderá ter no interior do porto.

Na Fig. 5, apresentam-se as curvas de resposta para três pontos selecionados (ver Fig. 3b).

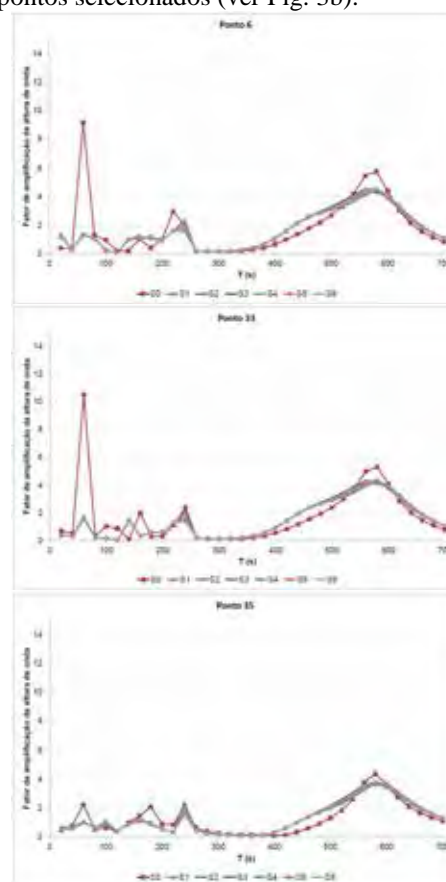


Fig. 5. P6, P33 e P35. Curvas de resposta

De modo geral, os resultados sugerem que as configurações propostas para o prolongamento do molhe tendem a atenuar as possíveis situações de ressonância no interior do porto, havendo, no entanto, algumas zonas em que tal não acontece. Não se verificaram diferenças significativas entre configurações.

## 4. AVALIAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NA PRAIA DE MATOSINHOS

Este estudo avaliou, comparativamente, as características da agitação marítima que se obtêm na proximidade da praia de Matosinhos, considerando cada uma das configurações portuárias testadas, Pinheiro *et al.* (2017c). Adotando a mesma metodologia utilizada no estudo de agitação (secção 3.1), obtiveram-se agora os regimes em vários

pontos em frente à praia de Matosinhos, de P30 a P49, indicados na Fig. 6. Com base nesses regimes, determinou-se o número médio de dias por ano em que as alturas significativas se situam nas classes indicadas na Fig. 7. Nesta mesma figura, para os pontos P42 a P45, apresenta-se, a sombreado azul, a zona de possível rebentação.

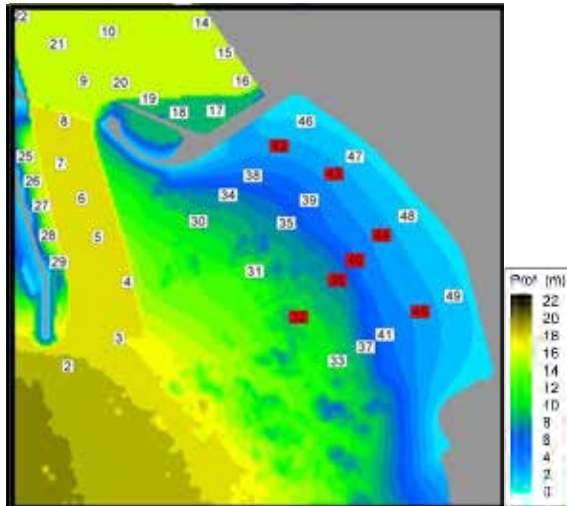


Fig. 6. Pontos de análise na Praia de Matosinhos.



Fig. 7. P42 a P45. Histogramas marginais de HS.

As configurações correspondentes ao prolongamento do molhe (qualquer que seja a inclinação) conduzem a um menor número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m, nas diferentes classes, nos pontos em análise, face à configuração atual (S0).

Em todos os pontos, o número de dias com alturas de onda nas classes superiores a 0.5 m aumenta, em geral, com a diminuição do comprimento do molhe e

a diferença do número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m para a situação de 0° e 20° é pequena.

O número de dias com alturas de onda superiores a 2.0 m diminui com o prolongamento do molhe, não diferindo muito entre configurações (S1 a S6).

## 5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação descrevem-se os estudos, em modelo numérico, efetuados para aferir diferentes soluções de prolongamento do quebra-mar exterior do porto de Leixões, avaliando, para cada solução, o abrigo no interior do porto bem como o modo como esse prolongamento se vai refletir nas condições de agitação da vizinha praia de Matosinhos.

Constatou-se que qualquer das soluções conduz a um maior abrigo da agitação marítima no canal de navegação, a uma atenuação, em termos dos coeficientes de amplificação e de velocidades, das possíveis ocorrências de ressonância no interior do porto e a uma redução generalizada das alturas de onda na praia de Matosinhos. Em geral, como esperado, as soluções com maior comprimento do prolongamento conduzem a um maior abrigo do canal de entrada do porto.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à APDL a disponibilização dos dados necessários aos estudos.

## REFERÊNCIAS

- APDL (2016). Pedido de apresentação de proposta. Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e do novo terminal de contentores do Porto de Leixões, julho.
- Capitão, R.; Pinheiro, L.V.; Fortes, C.J.E.M. (2017) Estudo I-Regimes de agitação marítima. LNEC - Proc. 0603/121/20692. Rel. 227/2017. DHA/NPE.
- Fortes, C.J.E.M. (1993). *Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.
- Pinheiro, L.; Fortes, C.J.E.M.; Neves, M.G. (2017a). Estudo I – Estudo de agitação - Propagação de ondas curtas para o interior do porto, com modelo numérico. Rel.296/2017- DHA/NPE, abril.
- Pinheiro, L.; Fortes, C.J.E.M.; Neves, M.G. (2017b). Estudo I – Estudo de ressonância - Propagação de ondas longas para o interior do porto, com modelo numérico. Rel.300/2017- DHA/NPE, abril.
- Pinheiro, L.; Fortes, C.J.E.M.; Neves, M.G. (2017c). Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos. Relatório Final. Rel. 306/2017- DHA/NPE, abril.

## NEREIDE: Operacionalização da investigação científica em ambiente costeiro e de plataforma pelo CESAM

Bosnic, I (1) & Petrini, E. (1) em nome da equipa CESAM (1)

(1) CESAM, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro.

**Resumo:** Com o objetivo de potenciar exponencialmente o conhecimento multidisciplinar do ambiente costeiro e plataforma continental, o CESAM identificou como necessidade primordial o investimento nas suas capacidades de exploração do meio marinho. Este investimento traduziu-se na aquisição de uma embarcação desenhada especificamente para fins científicos, e em simultâneo foram iniciados os procedimentos para a aquisição de equipamento científico dedicado. Entre os principais equipamentos disponíveis estão o sistema acústico de sondagem multifeixe Kongsberg EM2040C, um perfilador de correntes ADCP RDi Workhorse 1200 kHz acoplado a um catamarã Riverboat, uma sonda multiparamétrica CTD Seabird 19plusV2 e um sonar de varrimento lateral EdgeTech SB-512i. A embarcação dispõe assim de instrumentação oceanográfica, geofísica e hidrográfica capaz de fornecer dados de carácter multi e transdisciplinar em zonas estratégicas e pouco exploradas do mar português, desde a costa até à plataforma continental.

**Palavras-chave:** embarcação; instrumentação oceanográfica

### 1. INTRODUÇÃO

O Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) da Universidade de Aveiro tem como um dos seus principais objetivos promover, no âmbito das ciências do ambiente e do mar, investigação multi e transdisciplinar. Esta, por sua vez, visa contribuir ativamente para a formulação e implementação das estratégias nacionais e Europeias ligadas ao desenvolvimento sustentável. Diante do facto do país estar estrategicamente voltado para o mar e da crescente necessidade de melhor conhecimento do ambiente costeiro e de plataforma, o CESAM vem investindo massivamente na sua capacidade de exploração do meio marinho. Um grande passo dado neste sentido foi a recente aquisição da embarcação NEREIDE (Figura 1), desenhada especificamente para fins científicos. Esta dispõe de instrumentação oceanográfica, geofísica e hidrográfica, conjunto que permite uma investigação multidisciplinar na área das ciências do mar.

Este trabalho tem por objetivo dar a conhecer à comunidade científica as potencialidades da embarcação NEREIDE, visando assim futuras colaborações na investigação voltada à exploração do meio marinho e zonas adjacentes.

### 2. EMBARCAÇÃO NEREIDE

A embarcação Nereide, capaz de navegar até a uma distância de 25 milhas da costa, foi completamente adaptada para fins científicos de maneira a suprir às diversas necessidades dos investigadores do CESAM. Com comprimento de 9.5 e boca de 3.05 m e capacidade para 8 pessoas, a embarcação conta

com um sistema de pórtilho à ré, pau de carga e sistema hidráulico associado, o que facilita a movimentação da instrumentação a bordo. A presença de um guincho hidráulico permite operações de descida/subida de sondas tipo CTD e similares até uma profundidade máxima de 200 m a uma velocidade de aproximadamente 1m/s.



Fig. 1. Embarcação NEREIDE.

### 3. INSTRUMENTAÇÃO

A embarcação NEREIDE dispõe de instrumentação capaz de fornecer dados de carácter multidisciplinar e cujas potencialidades estão descritas a seguir.

#### 3.1. Sistema combinado de sonar de varrimento lateral e CHIRP EdgeTech SB-512i

Este sistema é composto por um sonar de varrimento lateral de frequência dupla simultânea 100/400 kHz e Chirp sonar com frequência de operação entre os 500 Hz e 12 kHz e profundidade máxima de operação de 300 m (Figura 2). A sua resolução vertical varia de acordo com a frequência utilizada e

em média varia entre 8 e 20 cm. Em termos de penetração, o sinal pode atingir 20 m em areias grosseiras e cascalho e aproximadamente 200 m em lamas acusticamente transparentes. A largura do feixe varia de 16° a 32°, sendo a sua velocidade ideal para o reboque de 3 a 5 nós. Dentre as inúmeras aplicações deste instrumento destacam-se o mapeamento, medição e classificação das camadas sedimentares. Esta valência permite a identificação de estruturas geológicas relevantes do ponto de vista da gestão do risco geológico (falhas) e também estruturas relevantes em termos económicos (indicativas de presença de gás). Para além disto, o mapeamento das camadas sedimentares permite também estimar potenciais volumes de dragagens. A localização de objetos no fundo marinho é também considerada umas das principais aplicações deste instrumento.



Fig. 2. Peixe do sistema combinado Chirp Sonar/Side Scan Sonar Edgetech SB-512i.

### 3.2. Sistema multifeixe Kongsberg EM2040C

O sistema multifeixe EM2040C é um ecobatímetro multifeixe de alta resolução vocacionado para águas rasas. O recetor e transmissor estão integrados numa cabeça de sonar comum. A estabilização do *roll e pitch e nearfield focusing* da embarcação é feita em tempo real através do sensor MRU-5. Este possui tecnologia de giroscópio avançada baseada no sistema MEMS, fornece precisão documentada de *roll e pitch* de 0.008° e ruído angular inferior a 0.002°. Esta precisão é possível graças ao uso de sensores inerciais precisos, incluindo três *rate gyros* e acelerómetros lineares.

O mapeamento detalhado do fundo é realizado a uma frequência de 200 a 400 kHz e permite ao usuário uma seleção em passos de 10 kHz (Kongsberg, 2014). Este sistema apresenta um excelente desempenho em zonas costeiras e portuárias, mostrando-se assim ideal para atividades de investigação em zonas de transição (ex. desembocaduras, rias e estuários) e portos. É capaz de detetar naufrágios, realizar o mapeamento de habitats naturais e da plataforma continental até a uma profundidade máxima de aproximadamente 490

m. O conjunto de dados obtido também pode ser utilizado para a caracterização das propriedades do material do fundo do mar.

De maneira a garantir a precisão espacial dos dados, o sistema multifeixe está acoplado a um sistema de posicionamento GNSS diferencial (Trimble R8s) que garante uma precisão horizontal de aproximadamente 8 mm e vertical de 15 mm.



Fig. 3. Sonda multifeixe EM2040C e sistema inercial MRU-5 acoplado.

### 3.3. ADCP RDI WH Sentinel 1200 kHz e catamarã Riverboat

O perfilador de correntes da RDI Workhorse Sentinel trabalha a uma frequência de 1200 kHz, sendo assim adequado a águas pouco profundas. O ADCP tem um alcance de até 150 m aproximadamente, podendo ser utilizado acoplado ao catamarã Riverboat da Teledyne Oceanscience, potencializando assim a coleta de dados do ADCP. Quando utilizado em modo acoplado ao catamarã, o seu alcance operacional passa a ser de 25 m (Figura 4).

Caracterizado baixo consumo de energia e alta precisão, o perfilador coleta mais dados de corrente com uma resolução de 0.1 cm/s e precisão de 0.3 cm/s. Pode ser acoplado a boias, rebocado pela embarcação e fundeado num ponto específico permitindo assim realizar estudos relacionados à variação da corrente na coluna de água.





Fig. 4. Perfilador de corrente acústico ADCP WH Sentinel 1200 kHz e catamarã Riverboat Teledyne Ocean science.

### 3.4. CTD Seabird 19plusV2

A sonda multiparamétrica Seabird 19plus V2 (Figura 5) é constituída por sensores de condutividade, temperatura e pressão da coluna de água com uma frequência de amostragem de 4 Hz. Para além dos parâmetros indicados, este equipamento tem sensores auxiliares acoplados capazes de medir o oxigénio dissolvido na água, fluorescência, turbidez e *Photosynthetically Active Radiation* (PAR). A sonda possui um revestimento de plástico e pode operar até um máximo de 600 metros de profundidade.

O fluxo de água é controlado por uma bomba interna que minimiza pequenos aumentos de salinidade medidos pelos sensores causado pelo deslocamento da embarcação, permitindo assim calar o equipamento lentamente sem interferir na resposta dos sensores. Este fator melhora a precisão dinâmica e permite uma análise em pequena escala da coluna de água. Este instrumento apresenta uma precisão de 0.003 PSU de salinidade, 0.005°C para a temperatura.



Fig. 5. Sonda multiparamétrica CTD Seabird 19plusV2.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A embarcação NEREIDE, juntamente com a sua instrumentação oceanográfica aqui apresentada, evidencia as excelentes capacidades de obtenção de dados multidisciplinares na área das ciências do mar. O nível de qualidade dos equipamentos permite a apresentação de resultados com alta resolução e frequência de amostragem, como a morfologia e ecologia do fundo, perfis verticais de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido na água, perfis verticais de corrente. Acresce ainda a possibilidade de mapear o perfil sísmico do fundo marinho das zonas em estudo. A embarcação pode ainda ser utilizada para recolha de amostras de água com aplicações na biologia e química.

As aplicações na investigação são inúmeras, sendo que existe sempre a possibilidade de novas áreas de estudo, que poderão ser ponderadas caso a caso, tendo em conta os meios humanos e equipamento científico disponível.

## REFERÊNCIAS

- Kongsberg (2014). "GeoSwath Plus. Wide Swath Bathymetry and Georeferenced Side Scan", Kongsberg GeoAcoustics, LTD, UK.

# Levantamento de dados usando múltiplos veículos autónomos: Estratégias e Resultados

José Pinto (1), João Borges de Sousa (1)

(1) Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), FEUP, Porto, Portugal.  
E-Mail: zepinto@fe.up.pt; jtasso@fe.up.pt

**Resumo:** Este artigo apresenta diferentes estratégias de levantamento de dados do fundo marinho usando múltiplos veículos autónomos. As diferentes estratégias passam pela geração automática de planos de acordo com as capacidades e situação actual dos veículos disponíveis. Esta pode ser realizada em modo offline, a bordo da plataforma ou de forma distribuída, adaptando os planos gerados a eventuais falhas e novos objectivos do utilizador. Todas as estratégias são ainda avaliadas de acordo com resultados no terreno usando veículos da classe LAUV (Light Autonomous Underwater Vehicle).

**Palavras-chave:** AUV, LAUV, Rede de sistemas de veículos e sensores

## 1. MOTIVAÇÃO

Apesar dos avanços no desenvolvimento de novos sonares e outras tecnologias relacionadas com mapeamento, o fundo oceânico continua na sua maior parte desconhecido. Existem mapas globais com o relevo aproximado do fundo do mar, ainda de muito baixa resolução, comparados com o tipo de resolução que existe para os mapas terrestres, devido às limitações dos sensores utilizados. Em comparação com uma câmara de alta resolução que, voando a centenas de metros de altitude pode cobrir uma área com milhares de quilómetros quadrados em poucas horas, um sonar multi-feixe ou de varrimento lateral exige um movimento lento da plataforma. Isto acontece porque o som propaga-se a uma velocidade significativamente menor que a luz (cerca de 200.000 vezes mais lento) e as mesmas câmaras não pode ser efetivamente usadas debaixo de água uma vez que a luz é rapidamente absorvida pela água do mar.

O LSTS tem vindo a desenvolver várias tecnologias que visam acelerar o mapeamento de fundo, minimizando custos de operação e a necessidade de interação humana. Estas tecnologias incluem novas plataformas robóticas bem como novos sistemas de apoio à decisão e algoritmos de coordenação. Quando combinadas, estas permitem o rápido mapeamento de zonas costeiras através da alocação automática de plataformas e resposta a incidentes também de forma autónoma, que é o objecto deste artigo.

## 2. PLATAFORMAS AUTÓNOMAS

O LSTS da FEUP tem ao seu dispor múltiplos veículos autónomos subaquáticos desenvolvidos internamente. Todos estes são do modelo LAUV e dividem-se em 3 classes principais: experimentais, coluna de água e mapeamento. Os veículos da classe experimental são usados principalmente para testes de comunicação e outros que possam comprometer a integridade da plataforma (destrutivos). Por tal, estes veículos têm um conjunto de sensores reduzidos.

Os 5 veículos da classe coluna de água têm como

objetivo serem utilizados em alto mar para monitorização de dados da coluna de água (salinidade, temperatura, clorofila, etc). Para tal, estes veículos são dotados de sondas multiparamétricas e navegam a maior parte do tempo junto da superfície e longe do fundo, o que permite que usem GPS periodicamente para corrigir a sua posição.

Por último, o LSTS dispõe de 4 veículos de mapeamento equipados com diferentes tipos de sonar (varrimento lateral e multi-feixe), bem como câmaras. Ao invés dos veículos utilizados para a coluna de água, os veículos de mapeamento navegam junto do fundo oceânico de forma a aumentar a resolução dos dados adquiridos com os sonares. Para que tal seja possível, um conjunto de sensores é usado para a navegação conforme explicado de seguida.



Fig. 1. Veículos de mapeamento do LSTS

### 2.1 Sistema de Navegação

Os LAUVs de mapeamento do LSTS estão equipados com vários sensores que permitem uma navegação bastante precisa à superfície e debaixo de água:

**GPS:** Sensor usado sempre que o veículo navega à superfície.

**Sonar frontal:** Usado para detectar obstáculos na frente do veículo e permitir que estes sejam evitados.

**DVL (Doppler Velocity Log):** Sonar multi-feixe que permite medir a distância ao fundo e a velocidade relativa do LAUV. Sensor usado quando o veículo navega a menos de 100 metros de distância do fundo.

**LBL (Long Base Line):** Transdutor acústico que

permite a comunicação através de mensagens acústicas e o posicionamento com recurso a faróis acústicos pré-instalados.

**INS (Inertial Navigation System):** Sistema de Navegação Inercial composto por bússola, giroscópio e múltiplos acelerómetros..

Apesar dos múltiplos sistemas de posicionamento, os LAUV têm que ainda assim vir periodicamente à superfície para corrigir a sua posição. Esta é a limitação de usar sensores mais acessíveis mas traz, em contrapartida, a vantagem de permitir a aquisição de vários veículos pelo preço típico de um único AUV de mapeamento.

## 2.2 Sensores de mapeamento

Os veículos LAUV utilizam principalmente 3 sensores para mapeamento do fundo:

**Sonar de varrimento lateral:** Permite rápida cobertura de zonas bastante amplas sendo possível cobrir uma linha transversal ao veículo com até 100 metros para cada lado. Para fazer o mapeamento do fundo, o veículo tem de se mover a uma velocidade constante de cerca de 1 m/s, mantendo também uma distância constante ao fundo para obtenção de dados com melhor qualidade.



Fig. 2. Exemplo de dados obtidos com sonar de varrimento lateral a bordo de um LAUV

**Sonar multi-feixe:** Permite obter a geometria do fundo através da emissão de múltiplos feixes acústicos e posterior medição do tempo de propagação (após reflexão). Para melhorar a qualidade dos resultados, os veículos têm que navegar a baixa velocidade (até 1 m/s) e manter uma distância considerável do fundo. Isto acontece porque a área coberta pelo sensor é tanto maior quanto a distância do veículo ao fundo. Em simultâneo, essa distância não pode ser superior a 100 metros (por limitações do sensor usado).

**Magnetómetro:** Este sensor permite detetar objetos ferrosos no leito marinho. Relativamente aos outros sensores, este é o único com a vantagem de permitir detetar objectos que estejam completamente soterrados. Tem no entanto a desvantagem de ter de ser usado muito próximo do fundo para poder identificar objetos de dimensões reduzidas.

**Câmara fotográfica:** Os LAUV estão ainda equipados com câmara fotográfica. Os dados obtidos podem ser bastante importantes para caracterizar o tipo de fundo e habitats, bem como identificar objetos previamente detetados com sonar de varrimento lateral. Como a luz do sol é rapidamente absorvida pela água, as câmaras

são acompanhadas de um sistema de iluminação (strobe) que consome bastante energia. Para obtenção de boas imagens do fundo, os veículos têm de navegar muito próximo do leito submarino, tipicamente a 2 metros (de acordo com a turbidez), dificultando o levantamento completo.

## 2.3 Comunicações

Para controlo e seguimento dos veículos, existem vários sistemas de comunicações utilizados:

**Wi-Fi:** Sistema usado para transferência de grandes quantidades de dados e bastante eficiente. Requer no entanto que o veículo esteja à superfície e a uma curta distância (< 1 Km) do sistema de recolha de dados.

**GSM:** Usado em situações de emergência, quando o veículo emerge e não consegue estabelecer ligação através de Wi-Fi. Nestes casos, o veículo usa este meio para transmitir a sua posição e estado, podendo ainda ser controlado através de comandos SMS.

**Iridium:** Sistema de comunicação satélite usado de forma semelhante ao GSM, permitindo transferir uma quantidade limitada de informação. Tem como vantagem poder ser utilizado em qualquer zona do mundo e a qualquer distância da costa.

**Modem Acústico:** Este é o único sistema que permite comunicação com estes veículos quando submergidos. Este sistema é mais limitado. A largura de banda é muito reduzida (na ordem dos 100 bps), é pouco fiável e as mensagens têm tempo de propagação considerável (velocidade do som). A utilização do modem acústico pode comprometer a qualidade dos dados recolhidos com sensores acústicos, como os sonares, pelo que deve ser usado apenas em última instância durante uma missão de mapeamento.

## 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com as seções anteriores, existem vários sensores que podem ser utilizados para mapeamento do fundo submarino, cada um com vantagens e restrições específicas. Foi também referido que o processo de mapeamento é bastante moroso, sendo para tal desejável (i) minimizar a comunicação com e entre os veículos, especialmente quando estes estão submergidos; (ii) acelerar o processo de mapeamento; (iii) garantir a qualidade dos resultados; (iv) minimizar a necessidade de intervenção humana.

Existem vários desafios relacionados com estes objetivos. Para garantir a qualidade dos dados, os veículos têm de minimizar o erro de localização o que obriga a emersões periódicas. Outro desafio está relacionado com o facto de os diferentes sensores necessitarem de diferentes distâncias ao fundo para obtenção de resultados óptimos.

## 4. APROXIMAÇÃO USANDO MÚLTIPLOS VEÍCULOS AUTÓNOMOS

Para acelerar o processo de mapeamento, o LSTS utiliza em múltiplos LAUVs de mapeamento, em simultâneo, permitindo que a mesma área seja

mapeada numa fração do tempo, dividindo em subáreas mais pequenas e atribuídas a diferentes veículos.

Os LAUV estão dotados de um conjunto de comportamentos, tais como a manobra “Pop-up”. Esta manobra faz com que o veículo se desloque à superfície, obtenha uma boa leitura de GPS (mais de 7 satélites) e submerja novamente até à profundidade anterior, minimizando assim o erro de posição durante o mapeamento.

O LSTS desenvolveu vários módulos de software para geração e alocação automática de planos, bem como software de bordo, permitindo assim a deteção e correção de falhas sem intervenção humana.

#### 4.1 Controlo de múltiplos veículos

Tipicamente, o controlo de múltiplos veículos obriga à existência do mesmo número de operadores, o que acaba por tornar a operação mais complexa devido à utilização de recursos partilhados, como o modem acústico da base para as comunicações, plataformas comuns para colocação e recolha dos veículos autónomos, etc. Para melhorar este processo, o LSTS desenvolveu um sistema de monitorização e planeamento automático para múltiplos veículos autónomos. O sistema, baseado na plataforma Neptus, deteta de forma automática todos os veículos disponíveis na zona, bem como as suas capacidades operacionais (sensores, limitações mecânicas, bateria, etc). Com base nestas capacidades, nas restrições impostas pelos sensores e objetivos de alto nível introduzidos pelo utilizador, o sistema é capaz de gerar um conjunto de planos (sequência de manobras) a ser executado por cada um dos veículos disponíveis.

Este sistema, baseado em planeamento temporal automático, garante que todos os planos maximizam a qualidade dos dados recolhidos, garantindo desta forma que os veículos: (i) naveguem na distância específica, requerida pelo sensor a usar para esse mapeamento; (ii) ascendam periodicamente à superfície; (iii) contactem regularmente a base para transmissão de dados, diminuindo a incerteza do operador; (iv) adaptem o seu comportamento aos tempos de operação pré-estabelecidos, reduzindo o tempo passado à superfície no caso de verificar atrasos e vice-versa.

#### 4.2 Planeamento Automático

O sistema é baseado no planeador LPG-TD (Vallati et al, 2013) e permite receber um modelo de domínio, isto é, uma descrição de todas as restrições e ações possíveis que o sistema pode realizar e, de acordo com um estado inicial e objetivos do utilizador, gerar de forma automática as ações a tomar para atingir o estado pedido (objetivos). Uma vez que este planeador inclui o domínio temporal, todas as ações geradas são temporizadas com o tempo estimado que deverão demorar.

No caso dos veículos LAUV e domínio específico das missões de mapeamento, o conjunto de ações possíveis é relativamente reduzido. Neste domínio, um veículo

pode: (i) mover-se para ponto de entrada de um “survey” (MOVE-TO-AREA); (ii) executar um mapeamento com sensor específico (SURVEY-ONE-PAYLOAD); (iii) mover-se para junto da base (MOVE-TO-BASE); (iv) comunicar com a base (COMMUNICATE).

A complexidade verifica-se pelo facto de múltiplas ações poderem ser executadas simultaneamente pelos diferentes veículos, bem como no objetivo de minimizar o tempo total despendido para completar um conjunto de mapeamentos com popups e comunicações periódicas com a base. Complexidade essa que é facilmente ultrapassada pelo planeador LPG-TD.

```
0.0000: (MOVE-TO-AREA NOPTILUS3 T05 AREA) [102.8600]
0.0000: (MOVE-TO-AREA NOPTILUS1 T04 AREA) [60.7900]
60.7906: (SURVEY-ONE-PAYLOAD NOPTILUS1 T04 MULTIBEAM) [289.5900]
102.8606: (SURVEY-ONE-PAYLOAD NOPTILUS3 T05 MULTIBEAM) [287.5100]
350.3808: (MOVE-TO-AREA NOPTILUS1 T03 AREA) [92.4700]
390.3708: (MOVE-TO-AREA NOPTILUS3 T02 AREA) [123.6900]
442.8516: (SURVEY-ONE-PAYLOAD NOPTILUS1 T03 MULTIBEAM) [289.5400]
514.0616: (SURVEY-ONE-PAYLOAD NOPTILUS3 T02 MULTIBEAM) [257.1300]
732.3912: (MOVE-TO-AREA NOPTILUS1 T06 AREA) [30.0000]
762.3915: (SURVEY-ONE-PAYLOAD NOPTILUS1 T06 MULTIBEAM) [281.2400]
771.1912: (MOVE-TO-AREA NOPTILUS3 T07 AREA) [49.5000]
820.6915: (SURVEY-ONE-PAYLOAD T07_MULTIBEAM) [281.3000]
1043.6317: (MOVE-TO-BASE NOPTILUS1 NOPTILUS1 DEPOT) [71.7300]
1115.3619: (COMMUNICATE NOPTILUS1 T06 MULTIBEAM) [60.0000]
1115.3619: (COMMUNICATE NOPTILUS1 T03 MULTIBEAM) [60.0000]
1115.3619: (COMMUNICATE NOPTILUS1 T04 MULTIBEAM) [60.0000]
1101.9917: (MOVE-TO-BASE NOPTILUS3 NOPTILUS3 DEPOT) [64.1800]
1166.1720: (COMMUNICATE NOPTILUS3 T07 MULTIBEAM) [60.0000]
1166.1720: (COMMUNICATE NOPTILUS3 T02 MULTIBEAM) [60.0000]
1166.1720: (COMMUNICATE NOPTILUS3 T05 MULTIBEAM) [60.0000]
```

Fig. 3. Exemplo de plano gerado pelo planeador LPG-TD

Os planos gerados (Fig. 3) incluem não só a ordem das ações que devem ocorrer, mas também uma estimativa da duração de cada uma dessas ações e resultante tempo de plano total.

#### 4.3 Interface de operação para múltiplos veículos

O planeador LPG-TD é usado como uma extensão da ferramenta Neptus (Dias et al, 2010), parte integrante da Toolchain de Software desenvolvida pelo LSTS (Pinto et al., 2013). Enquanto o planeador está encarregue de atribuir ações às plataformas disponíveis, o software Neptus está responsável por detetar todas as plataformas disponíveis e suas capacidades e permitir ao operador indicar os objetivos de alto nível pretendidos.

Os objetivos de alto nível que podem ser inseridos são pontos e áreas poligonais a serem mapeadas (cada área associada a um tipo de sensor). No caso de a área ser muito grande, o Neptus subdivide-a automaticamente e cria um padrão de cobertura para essa área, minimizando as curvas necessárias para cobrir toda esta área (Fig. 4).

A interface de operação visa minimizar o número de decisões que o operador tem de realizar, sendo que as subáreas resultantes têm todas sensivelmente a mesma duração, sendo esta inferior ao tempo máximo que os veículos podem passar debaixo de água (por minorar erros de localização).

Enquanto o veículo está desligado da consola, a interface de operação Neptus corre ainda uma simulação simples dos planos que os diferentes veículos estão a executar debaixo de água. Esta simulação permite ao operador ficar a par das diferentes ações que estão a ser realizadas sem

necessidade de comunicação (que danifica os dados).



Fig. 4. Interface de operação baseada em Neptune. À esquerda zona a mapear definida pelo utilizador e, à direita, 6 sub-áreas resultantes calculadas pelo Neptune.

#### 4.4. Execução adaptativa

O conjunto de ações e temporizações geradas pelo LPG-TD são transmitidas aos diferentes veículos implicados no plano. A bordo destes corre um software de execução adaptativa baseado em Java. Este software interpreta o plano e comanda a execução dos diferentes comportamentos (MOVE, SURVEY, COMMUNICATE) nos tempos definidos. As ações SURVEY são executadas sempre conforme os requisitos do sensor usado (velocidade e distância ao fundo) mas no caso das ações MOVE, estas são executadas a uma velocidade que depende do ponto previsto de término da ação. Já as ações COMMUNICATE têm uma duração que varia de acordo com possíveis atrasos do veículo. Caso o executivo detete uma falha no veículo controlado, este reporta a falha à base, garantindo que as tarefas que tinham sido atribuídas a este veículo sejam reatribuídas.

## 5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O sistema descrito neste artigo foi testado múltiplas vezes no Porto de Leixões. Esta área foi escolhida devido à proximidade com o LSTS mas também devido a ser um local típico onde a utilização de AUVs é vantajosa: zona bastante estruturada com águas rasas e pouca corrente. Nestes testes foram utilizados 3 LAUVs todos equipados com sonar de varrimento lateral e 1 deles com câmara fotográfica.

Numa primeira fase o operador desenhou a área a mapear no Neptune e os 3 veículos foram alocados pela ferramenta, assim que os diferentes veículos foram comunicando os resultados com a base através de Wi-Fi, os dados foram analisados e identificados alguns contactos (objetos de interesse) nos dados de sonar.

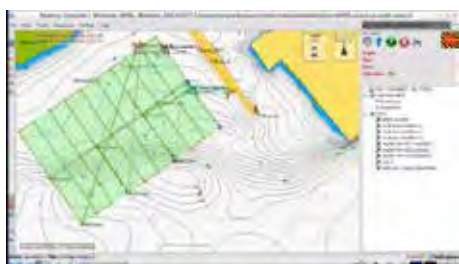


Fig. 5. Planos gerados e atribuídos aos diferentes veículos na consola de operação Neptune

Numa segunda fase, um conjunto de tarefas pontuais foi adicionado para captação com câmara fotográfica. Estas tarefas foram sendo atribuídas automaticamente

ao único veículo que transportava a câmara fotográfica



Fig. 6. Dados recolhidos por um dos veículos como resultado de duas sub-áreas atribuídas

Foram também realizados outros testes em ambiente operacional. Por exemplo, durante Julho de 2017 foram feitos vários levantamentos com múltiplos veículos ao largo da praia da Comporta (Tróia) usando este sistema. No caso destes testes, estes estavam inseridos no exercício anual REP (Rapid Environmental Picture) organizado pela Universidade do Porto, Marinha Portuguesa e pelo Center for Maritime Research Experimentation da NATO.

Neste caso, os 3 LAUV foram operados a partir de uma lancha patrulha da Marinha Portuguesa (NRP Centauro), e realizada por um único operador.

Durante os testes um dos LAUVs colidiu com uma armadilha (“covo”) interrompendo o comportamento de mapeamento. O executivo, detetando este evento, avançou para o próximo objetivo e marcou a tarefa anterior como não terminada. Assim que voltou à base para comunicação, essa tarefa foi reatribuída mas entretanto cancelada pelo utilizador (para evitar nova colisão).

As tecnologias desenvolvidas permitiram o controlo eficiente de múltiplos veículos minimizando os erros de operação e permitindo ao operador ficar a par de todas as ações que os diferentes veículos vão realizando. Todas as restrições e particularidades dos veículos / sensores são endereçadas pelo planeador sendo que os planos gerados visam não só cumprir as restrições mas ainda minimizar o tempo total despendido para cumprir os objetivos pedidos pelo utilizador.

## Referências

- Dias, P. S. J.; Pinto, R. Gonçalves and J. B. Sousa, "Enabling a dialog – A C2I infrastructure for unmanned vehicles and sensors," 2010 Int. Conference on Autonomous and Intelligent Systems, AIS 2010, Povoia de Varzim, 2010.
- Pinto, J.; P. S. Dias, R. Martins, J. Fortuna, E. Marques and J. Sousa, "The LSTS toolchain for networked vehicle systems," 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, 2013.
- Vallati, M.; Chris Fawcett, Alfonso Gerevini, Holger H. Hoos, Alessandro Saetti, Automatic Generation of Efficient Domain-Optimized Planners from Generic Parametrized Planners. Proceedings of the Sixth Annual Symposium on Combinatorial Search (SOCS-13), Leavenworth (WA), 2013.

# Índice de autores

## A

Abreu, T. ....	265
Agostinho P. ....	222
Almeida, S. ....	395, 412, 424
Alonso-Martirena, A. ....	222
Alves, A. ....	73,74, 83
Alves, José M. R. ....	159
Alves, M. ....	412
Amorim, A. ....	151
Andrade, C. ....	269, 293
Andriolo, U. ....	65, 214
Angélico, M. M. ....	210
Anjos, B. ....	404
Antunes, C. ....	190, 428
Azevedo, A. ....	41,65, 105, 273
Azevedo, C. C. ....	171, 175

## B

Banha, M. J. ....	186
Baptista, P. ....	265
Barrera, C. ....	125, 136, 140
Barroqueiro, T. ....	222
Bartolomeu, S. ....	121, 132
Bastos, A. ....	269
Bastos, L. ....	206, 281
Benbrahim, S. ....	128
Bernardes, A. C. ....	109
Bernardes, C. ....	265
Bica, V. ....	401
Bio, A. ....	206, 281
Birrien, F. ....	41
Borges, C. ....	311, 424
Bosnic, I. ....	478
Brotas, V. ....	125
Bruno, M. ....	218
Bué, I. ....	87

## C

Caetano, M. ....	401, 404
Café, Bruno ....	163
Caldeira, F. ....	416
Caldeira, Rui M. A. ..	128, 140, 159, 171, 175, 218
Calvo, R. ....	353
Camargo, C. ....	175
Camargo, Simone S. B. ....	155
Campuzano, F. ....	125, 210
Capela, D. ....	315
Capitão, R. ....	466, 470, 474
Carapuço, M. ....	293
Carazzai, D. ....	297
Carinhas, D. ....	179, 289
Carvalho, A. ....	33,113
Carvalho, J. ....	33
Carvalho, P. ....	45
Carvalho, R. ....	57
Castro, J. ....	226
Castro-Jiménez, J. ....	315

Catalão, J. ....	37, 87, 432
Catita, C. ....	428
Coelho, C. ....	265
Conde, J. ....	462
Cordeiro, N. ....	167
Corrêa, D. L. ....	183
Correia, A. ....	420
Correia, A. ....	440
Correia, C. ....	307
Costa, Ana L. ....	206
Costa, C. L. da ....	101, 147, 387
Costa, A. ....	436
Costa, F.S. ....	183
Couto, P. ....	408
Cravo, A. ....	307, 322
Cruz, F. ....	381
Cruz, G. ....	273
Cruz, J. ....	369
Cunha, Silas ....	337

## D

Dabrowski, T. ....	125
David, M. ....	105
Dias, T. G. ....	45
Didier, E. ....	447
Duarte, J. F. ....	261
Dubert, J. ....	167, 373

## E

Espinosa, S. ....	29
-------------------	----

## F

Faria, C. ....	459
Faria, M. J. ....	293
Fernandes, C. ....	222
Fernandes, M. ....	222
Fernandes, R. ....	128
Fernández-Fernández, S. ....	265
Ferreira, Afonso C. ....	440
Ferreira, A. ....	269
Ferreira, C. ....	265
Ferreira, F. ....	341
Ferreira, Pedro L. ....	353
Figueiredo, C. ....	391
Fonseca, A. ....	401
Fonseca, R. ....	330
Fontán-Bouzas, Á. ....	265
Fortes, C. J. ....	91, 95, 226, 466, 470, 474
Fortes, I. ....	73,77
Fortunato, A. ....	105, 194, 198, 273
Fradique, C. ....	369
Freire, P. ....	273
Furtado, D. ....	401

## G

Galvão, P. ....	391
García, M. ....	125

Garcia, E.S. ....	214
Gaspar, J. ....	33
Giollo, R. ....	408
Girão, I. ....	408
Godinho, S. ....	33, 395
Gomes, A. L. ....	401
Gomes, J. ....	105
Gomiz-Pascual, J. ....	218
Gonçalves, J. A. ....	281
Gonçalves, L. ....	459
Granja, H. ....	206
Groom, S. ....	125
Guerreiro, R. ....	49, 87
Guimarães, F. ....	353
<b>H</b>	
Hartman, S. ....	125
Henriques, M. J. ....	466
Hernández, J. ....	136, 140
Hinostroza, M. ....	91
Homem, V. ....	315
<b>I</b>	
Iglesias, I. ....	206, 281
Infante, P. ....	179
Inverno, C. ....	353
<b>J</b>	
Jacob, José ....	307, 322
Janeiro, João ....	117
Jiménez-Guerrero, P. ....	315
José, Antonieta ....	73, 77
Juliano, M. ....	125, 210
<b>K</b>	
Kaufmann, M. ....	125
Klein, Antônio H.F. ....	297
<b>L</b>	
Lamas, L. ....	21, 25
Lapa, N. ....	357, 451
Le Floch, S. ....	128
Leitão, J. ....	121, 132
Leitão, P. ....	121, 132, 391
Lemos, R. ....	408, 466, 470
Lima, R. ....	459
Limpinho, M. H. ....	387
Lira, C. P. ....	293
Llinas, O. ....	136, 140
Lopes, P. ....	95
Lopes, H. ....	474
Lourenço, N. ....	113
Lux, M. ....	125
Luz, C. ....	397
<b>M</b>	
Machado, J. ....	202
Madeira, F. ....	190
Magalhães, A. ....	281
Marques, F. ....	357
Marques, N. N. ....	147
Marques, Pedro V. ....	101
Marques, C. V. ....	45, 49, 53, 57, 61, 69, 297
Marreiros, J. ....	83
Martinho, António S. ....	395
Martins, A. ....	125
Martins, F. ....	117
Martins, M. ....	459
Martins, N. ....	222
Maslov, D. ....	381
Medeiro, A. ....	109
Melo, A. R. ....	432
Melo, L. ....	241
Mendes, D. ....	65, 194, 198, 202, 214
Mendes, V. B. ....	83
Mendonça, Ana ....	226, 326, 470
Mill, G. N. ....	183
Miranda, Pedro M. A. ....	159
Miranda, T. ....	381
Moita, M. T. ....	151
Monteiro, C. ....	45, 49, 53, 57, 69, 297
Monteiro, J. H. ....	353
Moraes, R. ....	237
Morales, T. ....	136
Moreira, S. ....	373
Morgado, A. ....	416, 440
Morgado, V. ....	303
Moura, A. ....	21, 25, 49
Mucha, A. P. ....	206
<b>N</b>	
Navarro, G. ....	218
Nave, S. ....	377
Neves, M. da Graça ....	186, 447, 455, 466, 470
Neves, R. ....	125, 128, 201
Noernberg, A. M. ....	277, 474
Nolasco, M. R. ....	167
Nunes, A. ....	61
Nunes, P. ....	33, 424, 440
<b>O</b>	
Oliveira, A. ....	105
Oliveira, A. ....	233, 241, 289, 337, 345
Oliveira, A. ....	103
Oliveira, F. ....	257, 285, 455
Oliveira, João N. ....	257
Oliveira, L. ....	436
Oliveira, Paulo B. ....	125, 151, 210
<b>P</b>	
Paiva, Afonso M. ....	155
Palma, C. ....	303, 311, 318, 326, 330
Patriarca, I. ....	73, 77
Patrício, P. ....	401, 404
Pedro, F. ....	91
Pedro, I. ....	391

Peliz, A. .... 159  
Pereira, E. .... 381  
Petrini, E. .... 478  
Pimentel, C. .... 404  
Pimentel, N. .... 361  
Pina, J. .... 105  
Pinheiro, J. .... 281  
Pinheiro, L. .... 91, 95, 474  
Pinheiro, M. .... 381  
Pinto, Á. .... 353  
Pinto, I. S. .... 113  
Pinto, J. .... 481  
Pinto, J. P. .... 21, 194, 198  
Pinto, L. .... 128  
Pires, D. .... 455  
Pires-Silva, A. .... 194, 198, 202  
Pombo, J. .... 373, 451  
Portela, L. I. .... 245, 253, 273  
Poseiro, P. .... 95

## Q

Quartau, R. .... 349, 365, 369

## R

Ramalho, R. .... 349, 369  
Ramos, A. .... 470  
Ratola, N. .... 315  
Real-Arce, D. .... 136  
Rebêlo, L. .... 377  
Rebour, X. .... 125  
Reis, Jesus R. .... 171, 218  
Reis, L. .... 341  
Reis, M. T. .... 466, 470  
Relvas, P. .... 167  
Reminez, X. .... 128  
Ribeiro, H. .... 109  
Ribeiro, M. .... 261  
Ricchi, A. .... 369  
Rocha, A. C. .... 318, 326  
Rocha, A. .... 436  
Rocha, C. .... 428  
Rocha, F. .... 315  
Rodrigues, A. 261, 357, 361, 365, 397, 432, 451  
Rodrigues, J. .... 121, 132  
Rodrigues, M. .... 105, 322  
Rogeiro, J. .... 105, 322  
Romão, S. .... 265  
Rosa, A. .... 307, 322  
Roscher, N. .... 57  
Ruas, J. .... 285  
Rueda, M. J. .... 140

## S

Sanches, P. .... 73,77  
Sánchez, C. C. .... 128  
Sanchez-García, E. .... 65  
Sancho, F. .... 41, 186, 249  
Santos, A. .... 337, 345

Santos, A. I. .... 233, 241, 289  
Santos, A. M. .... 113  
Santos, J. A. .... 91, 95  
Santos, Rita .... 233, 345  
Santos, M. .... 151  
Santos, P. .... 318, 326  
Santos, Ruben .... 365, 432  
Saramago, A. .... 397, 424  
Serronha, A. .... 401, 416  
Silva, A. .... 121,132, 391, 412  
Silva, A. N. .... 269, 293  
Silva, G. .... 171  
Silva, H. .... 401  
Silva, L. G. .... 466  
Silva, Marco .... 404  
Silva, M. J. .... 408  
Silva, Marisa .... 404  
Silva, Paulo A. .... 265  
Silva, Pedro F. .... 349  
Silva, R. B. .... 303, 311  
Silva, R. .... 318  
Silva, Sandra .... 341, 349  
Simão, Ana P. .... 125  
Sobrinho, J. .... 128  
Sousa, C. .... 77  
Sousa, J. .... 481  
Sousa, P. .... 113

## T

Taborda, R. .... 65, 214, 261, 269, 293  
Tavares, R. .... 163  
Teixeira, J. .... 105  
Teixeira, P. F. .... 447  
Teixeira, S. .... 249  
Torres, José R. .... 29  
Trigo Teixeira, A. .... 249, 257, 285

## U

## V

Vasco, E. .... 167  
Vasconcelos, M. M. .... 109  
Veiga, L. .... 424  
Vieira, F. .... 125  
Vieira, R. .... 218  
Vilar, P. .... 21, 25, 49  
Villarreal, M.R. .... 125  
Vinhas, A. .... 349, 357, 361, 369

## W

Waldmann, C. .... 140

## X

## Y

## Z

Zacarias, N. .... 241





Instituto Hidrográfico  
Rua das Trinas, 49  
1249-093 Lisboa – Portugal  
Tel.: +351 210 943 000  
mail@hidrografico.pt  
www.hidrografico.pt



## PATROCINADORES



**KONGSBERG**



**MRA**  
GRUPO ÁLAVA



**WonderStatus**  
SOLUÇÕES DE LAB. INVESTIGAÇÃO E INDÚSTRIA

