

## HIDRODINÂMICA DA BAÍA DO LOBITO. PARTE II – ESCOAMENTO BAROCLÍNICO

António Evaristo<sup>1,2</sup>, Ramiro Neves<sup>1,3</sup>, Lúgia Pinto<sup>@1</sup>, João Sobrinho<sup>1,4</sup>

**RESUMO:** Este trabalho constitui a segunda parte do estudo da hidrodinâmica da Baía do Lobito (Angola). Na primeira parte do trabalho foi estudada a hidrodinâmica produzida pela maré utilizando um modelo bidimensional e foram calculados os tempos de residência na Baía se o escoamento fosse só devido à maré. Nesta segunda parte do trabalho é estudada a hidrodinâmica forçada também pelo vento – dominante de oeste sobre a Baía - e pela estratificação térmica, utilizando um modelo tridimensional baroclínico. São apresentados resultados para diferentes regimes de vento que evidenciam a circulação dominante em duas camadas, com entrada de água do mar pelo fundo e saída pela superfície, o que induz tempos de residência no interior da baía que variam entre dias e semanas.

**Palavras-chave:** Hidrodinâmica, Baía do Lobito, Tempos de Residência, Regime de vento.

**ABSTRACT:** This work is the second part of the study of the hydrodynamics of Lobito Bay (Angola). In the first part of the work, hydrodynamics due to the tide was studied using a two-dimensional model and the residence times that should be expected in the Bay were calculated if the flow was due only to the tide. In this second part of the work the hydrodynamics of the bay forced by wind – westerly dominant over the Bay – and by thermal stratification is studied, using a three-dimensional baroclinic model. Results are presented for different wind regimes and the dominant circulation in two layers is highlighted, with seawater entering across the bottom and exiting from the surface, which induces residence times inside the bay that can vary between days and weeks.

**Keywords:** Hydrodynamics, Lobito Bay, Residence Time, Wind Regime.

---

@ Corresponding author: [ligia.pinto@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ligia.pinto@tecnico.ulisboa.pt)

1 MARETEC—Marine, Environment and Technology Centre, Instituto Superior Técnico, LARSys, Universidade de Lisboa

2 [evaristoleao@yahoo.com.br](mailto:evaristoleao@yahoo.com.br)

3 [ramiro.neves@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ramiro.neves@tecnico.ulisboa.pt)

4 [joao.sobrinho@tecnico.ulisboa.pt](mailto:joao.sobrinho@tecnico.ulisboa.pt)

## 1. INTRODUÇÃO

A Baía do Lobito é um sistema costeiro separado do mar por uma restinga de areia longa e estreita, com cerca de 6 km de comprimento e 300 m de largura, onde a afluência de água doce é essencialmente devida a descargas de águas residuais urbanas da cidade do Lobito e da zona portuária. Do lado de terra a costa é montanhosa com elevações do terreno de 350 m a 8 km da costa, protegendo a Baía dos ventos de Leste. No interior da baía está instalado o Porto do Lobito, o segundo maior de Angola.

A primeira parte do trabalho (Evaristo *et al.*, 2021) descreve o escoamento de maré e mostra que o modelo simula bem a sua propagação, reproduzindo as fases e as amplitudes medidas no interior da Baía. A maré gera dois grandes vórtices residuais concordantes com a batimetria, um na metade interior da baía e outro na metade exterior. Se a maré fosse o principal mecanismo responsável pela hidrodinâmica da Baía, estes dois vórtices seriam os principais responsáveis pelo tempo de residência, o qual seria de meses na metade interior. O estado trófico da água no interior da Baía é bom, com concentrações de clorofila medidas em junho de 2014 de 4.2 µg/l, o que sugere que a acumulação de nutrientes provenientes das descargas da cidade e de outras fontes locais, é baixa. Para que a acumulação de nutrientes seja baixa é necessário que o tempo de residência seja baixo. Esta hipótese foi avaliada implementando um modelo tridimensional baroclínico na Baía, forçado pelo vento, pelas trocas de calor com a atmosfera e pela maré. Esta última é importante para simular as variações de nível e incluir o efeito das oscilações de nível nas zonas de entre - marés, existentes na região urbana do Lobito, na hidrodinâmica e no tempo de residência.

Os dados necessários à imposição do forçamento atmosférico são provenientes do modelo GFS, (*Global Forecasting System da NOAA, National Oceanic Atmospheric Administration*<sup>5</sup>) e os dados necessários ao forçamento baroclínico nas fronteiras abertas são provenientes do *Copernicus Marine Service*<sup>6</sup>. Foram simulados períodos de ventos de Oeste, que representam as situações típicas na Baía.

O cálculo dos tempos de residência foi levado a cabo utilizando a metodologia proposta por Braunschweig *et al.* (2003) para

o estuário do Tejo e validada por Kenov *et al.* (2012) no estuário do Mondego e utilizada nesta baía por Evaristo *et al.* (2021) para calcular os tempos de residência considerando exclusivamente o efeito da maré. Com base nesses resultados foi mostrado que a maré condiciona os níveis (e por isso as trocas entre a baía e o sapal existente na região) mas não condiciona os tempos de residência no interior da baía, tendo sido adiantada a hipótese de que o tempo de residência seja condicionado pela conjugação da estratificação térmica e do vento dominante, de Oeste.

As descargas de águas residuais urbanas e eventuais descargas de águas residuais proveniente da envolvente da Baía constituem a maior pressão sobre a qualidade da água. Estas descargas são transportadas por água doce e por conseguinte são transportadas à superfície. Sendo o vento determinante para os tempos de residência no interior da Baía é de esperar que o tempo de residência destas descargas seja inferior ao tempo de residência médio da água na Baía. Este regime de ventos associado à estratificação térmica é, por conseguinte, determinante para a qualidade da água no interior da baía em condições normais.

## 2. ÁREA DE ESTUDO: BAÍA DO LOBITO-ANGOLA

A Baía do Lobito (Figura 1) é o principal corpo de água costeira, em termos de ocupação populacional e industrial, da província de Benguela e tem condições portuárias excecionais. A profundidade é da ordem dos 18 m e a restinga oferece condições naturais de protecção que tornam este porto num dos principais da África Austral. O porto do Lobito serve o corredor centro e sul de Angola, através de caminho-de-ferro, sendo um dos motores do desenvolvimento das cidades do Lobito e de Benguela. O Município do Lobito tem uma população superior a um milhão de habitantes e cerca de 500 indústrias, incluindo uma refinaria de petróleo em fase final de construção.

Os dados de campo nesta região são muito escassos e consequentemente o sistema tem de ser analisado recorrendo a resultados de modelos matemáticos, incluindo para o vento, devendo a qualidade desses dados ser analisada com base na consistência dos resultados. A Figura 2 mostra médias mensais da intensidade e direção do vento no ano de 2014 obtidas através de resultados do modelo GFS, da NOAA. O vento sopra de Oeste praticamente todo o ano, sendo a velocidade média da ordem de 1m/s. Intensidades máximas da ordem de 3 m/s são registadas no período novembro a maio e as mínimas entre junho e agosto.

5 <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

6 <http://marine.copernicus.eu/>



Figura 1. Localização das principais indústrias em redor da Baía do Lobito.

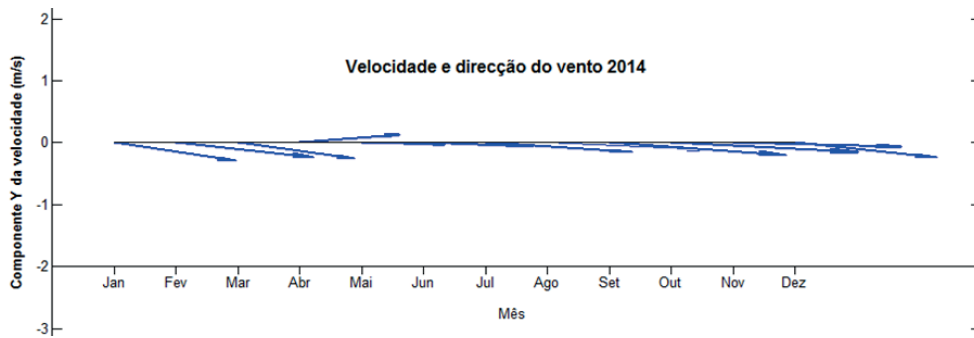


Figura 2. Velocidades médias mensais na Baía do Lobito obtidas a partir de resultados do modelo GFS (NOAA) para o ano de 2014. Os ventos são dominantes de Oeste, com intensidades médias da ordem de 1 m/s.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O escoamento foi simulado utilizando o modelo numérico Mohid Water (Neves, 2013) que é um sistema modular, de código aberto cujo desenvolvimento foi iniciado no Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa baseado em volumes finitos, que permite utilizar malhas verticais cartesianas, sigma ou uma combinação de ambas. O modelo permite o movimento vertical das camadas da malha para reduzir as trocas de água entre camadas e assim minimizar a difusão numérica associada a ondas internas. A versatilidade da estrutura modular permite que o modelo possa ser utilizado em praticamente qualquer escoamento com superfície livre. O modelo MOHID já foi aplicado na maioria dos estuários portugueses para simular a

hidrodinâmica, qualidade da água e transporte de sedimentos (e.g. Trancoso *et al.*, 2005; Coelho *et al.*, 1998; Saraiva *et al.*, 2007; Lopes *et al.*, 2009; Malhadas *et al.*, 2010; Gaspar *et al.*, 2017; Vaz, *et al.*, 2019; De pablo *et al.*, 2019) e em mares regionais (Martins *et al.*, 2001; Mateus *et al.*, 2012; Figueiredo *et al.*, 2018).

#### 3.1 Equações para o escoamento

As equações que descrevem o escoamento tridimensional em estuários e baías admitindo pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq são:

Conservação da massa:

$$(\partial u_i)/(\partial x_i) = 0$$

Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial(u_1 u_j)}{\partial x_i} - f u_2 = g \frac{\partial \eta}{\partial x_1} -$$

$$g \int_z^\eta \left( \frac{\partial \rho'}{\partial x_1} \right) dz + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \right)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\partial(u_2 u_j)}{\partial x_i} - f u_1 = g \frac{\partial \eta}{\partial x_2} -$$

$$g \int_z^\eta \left( \frac{\partial \rho'}{\partial x_2} \right) dz + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_2}{\partial x_i} \right)$$

em que  $\mu_i$  representa a viscosidade,  $f$  o parâmetro de coriolis,  $\eta$  a elevação da superfície livre,  $\rho'$  a anomalia de densidade e  $\mu$  a viscosidade. A resolução destas equações necessita ainda de uma equação de estado  $\rho = f_\rho(S, T)$  relacionando a densidade com a temperatura e a salinidade (desprezando o efeito da matéria particulada na densidade).

Estas propriedades são calculadas através da equação de transporte:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(C u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \vartheta \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)$$

em que  $C$  representa uma propriedade genérica e  $\vartheta$  a difusividade. No caso da salinidade os fluxos através da superfície livre são nulos. No caso da temperatura os fluxos de calor são nulos através do fundo e na superfície livre são função da radiação e das trocas de calor sensível e latente entre a água e atmosfera. Um modelo de turbulência para calcular a difusividade de quantidade de movimento, de calor e de salinidade completa as equações resolvidas pelo modelo.

### 3.2 Aplicação na Baía do Lobito

A aplicação na Baía do Lobito utiliza o sistema de 4 modelos encaixados representado na Figura 3. O modelo de maior extensão (nível zero) utiliza uma malha de 4 km de passo

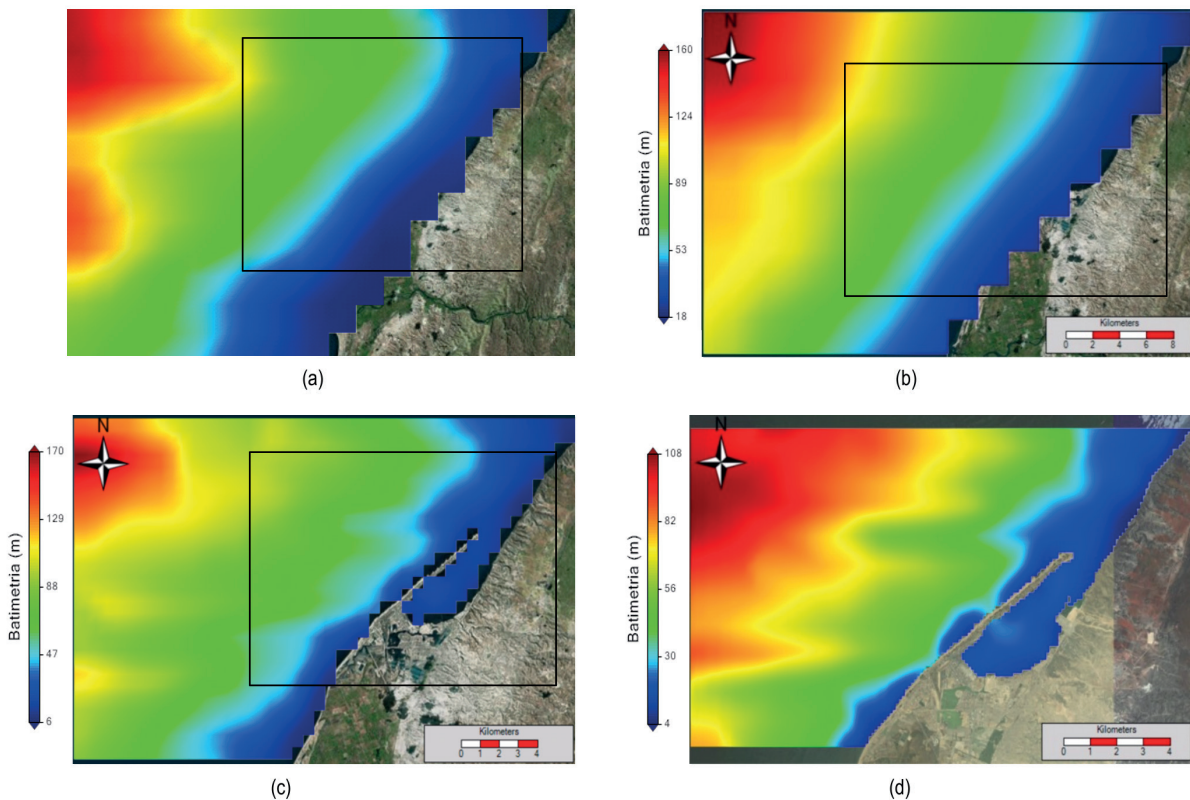


Figura 3. Sistema de modelos encaixados utilizado para simular o escoamento baroclínico na Baía do Lobito. O modelo de maior extensão (nível zero) e o modelo de nível 1 têm passo espacial de 2 km. O modelo de nível 2 tem passo espacial de 500 m e o modelo mais fino tem passo de 110 m (nível 3).

espacial e resolve a propagação da maré utilizando uma camada, i. e., em 2D. O modelo de maré é forçado utilizando resultados do modelo FES2004 (Evaristo *et al.*, 2021). O modelo seguinte (nível 1) simula o escoamento baroclínico, o vento e a maré utilizando um passo espacial de 2 km. Este modelo é forçado utilizando resultados do serviço Copernicus cujo nível é perturbado pelos resultados do modelo de maré (nível zero). As temperaturas e salinidades impostas na fronteira são extraídas do serviço Copernicus e os níveis são a soma dos níveis fornecidos por este serviço (valor médio diário) e dos níveis de maré calculados pelo modelo de nível zero. Estes dois modelos constituem a infraestrutura básica de simulação, sendo o modelo de nível 2 um submodelo do modelo baroclínico de nível 1. Utiliza um passo espacial de 500 m e produz resultados para forçar o modelo da Baía que utiliza um passo espacial de 110 m. Todos os modelos 3D utilizam a mesma discretização vertical, baseada numa malha cartesiana com 27 camadas na zona mais profunda.

A escassez de dados na Baía do Lobito inclui a falta de dados de batimetria. Esta falta de dados que poderá ser explicada pela profundidade média elevada e a baixa taxa de assoreamento - e consequente facilidade de gestão das operações portuárias - com necessidade de dragagens só em zonas restritas. Os dados de batimetria são provenientes da NASA SRTM 30 (*Shuttle Radar Topography Mission*) e a linha de costa foi extraída da base de dados do NGDC (*National Geophysical Data Center*) os quais foram os melhores, encontrados para esta zona. A batimetria foi objeto de verificação aquando da realização de perfis verticais de salinidade e de temperatura, que mostrou que a profundidade na generalidade da Baía é da ordem dos 20 m. A linha de costa foi verificada/corrigida utilizando as imagens do Google Earth. A Figura 3 mostra a batimetria do nível 3 (modelo mais refinado) utilizada nas simulações.

A meteorologia é outro dos dados que só foi possível encontrar em bases de dados internacionais. Neste caso foram utilizados resultados do GFS da NOAA. O facto de esta região estar sob acção directa dos ventos forçados pelo anticiclone do Atlântico Sul e de estes soprarem no Lobito predominantemente do mar permite a utilização de ventos provenientes de um modelo com baixa resolução como é o GFS nesta zona (0.5 graus).

Os níveis de maré foram validados por comparação com os resultados de Evaristo *et al.* (2021) o qual validou os resultados do modelo de maré utilizando componentes de maré obtidas a partir da análise harmónica de registos de maré do início dos anos 70 no Porto do Lobito. Não foi possível verificar

estas componentes harmónicas utilizando outros dados de campo, no entanto, a estabilidade batimétrica da Baía e a concordância entre os níveis calculados a partir daquelas componentes e os níveis de maré calculados pelo modelo sugere que ainda são válidas. O escoamento tridimensional foi analisado essencialmente em termos de consistência do padrão de circulação, complementados com a utilização de alguns perfis de temperatura e de salinidade medidos numa campanha realizada em junho de 2014.

O sistema de modelos encaixados utilizado neste trabalho permitiu assim obter resultados na Baía do Lobito utilizando dados do domínio público produzidos por modelos de escala global e alguns dados históricos disponíveis. Os resultados obtidos são consistentes com os dados disponíveis e com o conhecimento geral do funcionamento da Baía, mostrando que esta metodologia é adequada para iniciar estudos ambientais em regiões com falta de dados.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

A circulação na Baía é forçada pela maré, pelo campo de densidade e pelo vento. A maré é responsável pela oscilação do nível no interior da Baía, mas gera correntes instantâneas e residuais muito baixas, que dificilmente promoveriam a renovação da água da Baía (Evaristo *et al.*, 2021). A estratificação de densidade no interior da Baía é essencialmente de origem térmica, porque os caudais de água doce descarregados no seu interior são muito baixos. As afluições de água doce na região são provenientes essencialmente do rio Catumbela, a sul da Baía e por isso não geram escoamento no interior da Baía. Assim, é de esperar que as condições hidrodinâmicas da baía sejam forçadas essencialmente pela maré, pelo vento e pelo aquecimento superficial, sendo os resultados apresentados neste capítulo organizados de acordo com este modelo conceptual de funcionamento. Os resultados do mês de junho de 2014 foram escolhidos para ilustrar o padrão de circulação porque para este mês estão disponíveis perfis de temperatura e salinidade superficial no interior da Baía e na sua envolvente.

A Figura 4 mostra a velocidade do vento durante o mês de junho. A parte superior da figura mostra médias diárias para todo o mês, a parte intermédia mostra valores horários durante todo o mês e a parte de baixo mostra médias horários para os primeiros 10 dias numa escala que facilita a leitura. As médias diárias mostram que ao longo de todo o mês o regime é idêntico. As médias horários mostram que também os padrões diários se repetem,

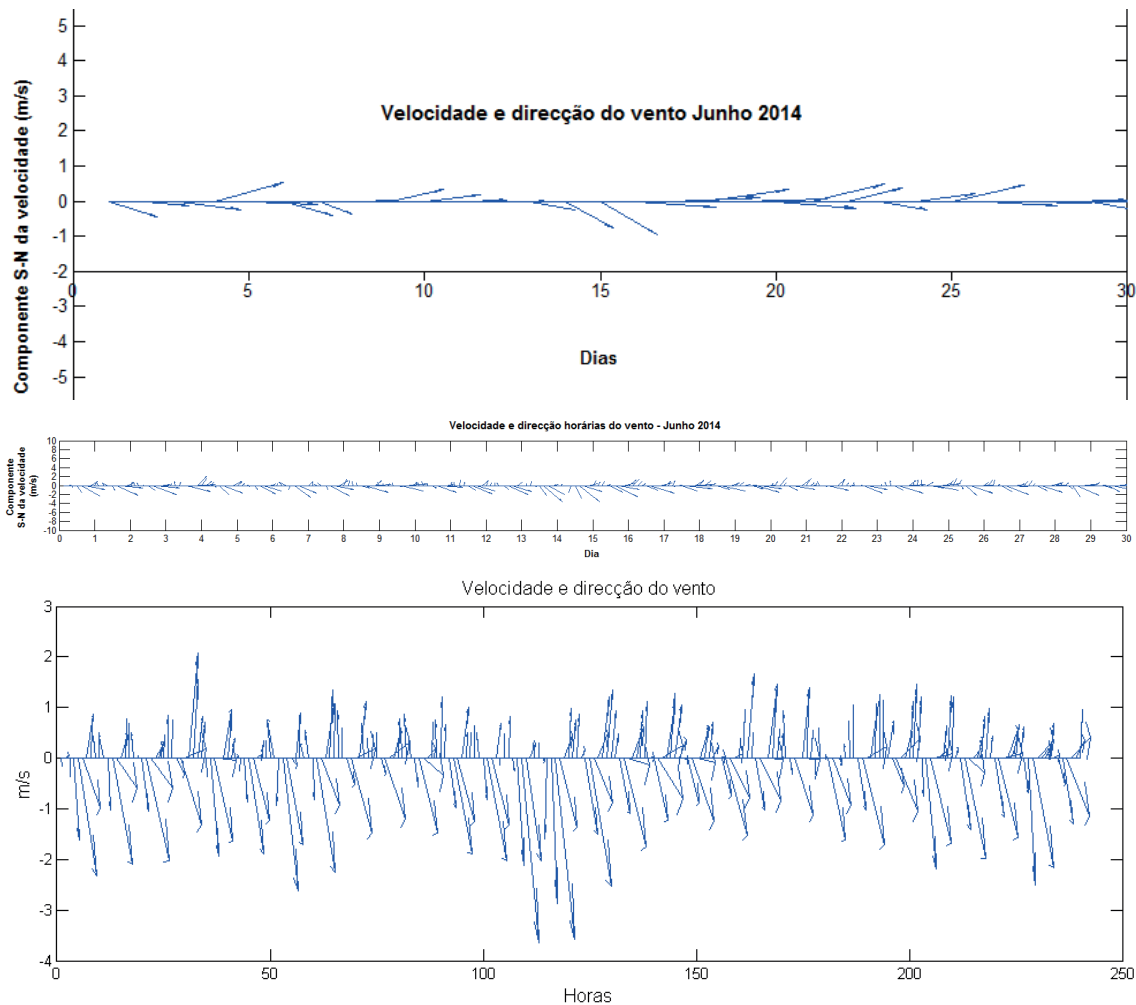


Figura 4. Valores da velocidade do vento durante o mês de junho de 2014. A parte superior da figura mostra médias diárias para todo o mês, a parte intermédia mostra valores horários durante todo o mês e a parte de baixo mostra médias horárias para os primeiros 10 dias. As figuras mostram a persistência dos ventos de oeste.

com alternância de direcção e sentido em cada dia, com vento intenso de noroeste ao início do dia e vento de sudoeste mais persistente, mas menos intenso durante cerca de 2/3 do dia. A integração ao longo do dia mostra a dominância de oeste, que associada ao efeito de coriolis força um escoamento superficial dirigido para fora da Baía (para norte).

A Figura 5 mostra, para um ponto localizado no interior da Baía (Porto do Lobito) a comparação entre os níveis calculados pelo modelo 3D e os níveis calculados pelo modelo 2D. As duas evoluções são idênticas, o que mostra que os níveis no interior da baía são determinados essencialmente pela maré.

A Figura 6 mostra os níveis e o campo de correntes residuais à superfície e no fundo da Baía durante o mês de junho de 2014.

As correntes são dirigidas do interior para o exterior da Baía à superfície e no sentido contrário no fundo, o que é consistente com o forçamento do vento do quadrante oeste. O nível médio mais alto no interior da Baía (da ordem de 0.5 mm) é uma consequência da estrutura térmica da coluna de água, cujo valor médio no interior da Baía é mais alto do que no exterior, embora à superfície seja mais baixo, como se mostra mais abaixo.

A Figura 7 mostra o escoamento instantâneo num corte longitudinal ao longo do eixo da Baía. A figura mostra que a estratificação vertical do escoamento é também clara no escoamento instantâneo, que se faz em duas camadas. A análise da figura mostra que existem trocas de água entre estas duas camadas, que induz recirculação da água da camada

superficial, que é responsável pelo aumento da temperatura da água do fundo. Este aumento de temperatura é visível nas medidas e nos resultados do modelo e é responsável pelo pequeno aumento do nível médio residual no interior da Baía apresentado na Figura 6.

Os dados *in-situ* disponíveis para validação dos resultados do modelo são perfis verticais de temperatura instantâneos e por isso são insuficientes para validar as temperaturas simuladas (muito dependentes dos valores impostos na fronteira) mas permitem validar a dinâmica do sistema, nomeadamente através das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior da baía e através da forma dos perfis verticais. Do lado direito da Figura 8 são apresentadas diferenças entre o perfil medido no interior da Baía (estação 28) e os perfis medidos nas estações 6 e 14. Quer as medidas quer o modelo mostram que nos primeiros 4 m a água é mais fria no interior da Baía do que no exterior mas que acontece ao contrário a profundidades superiores a 5 m. A análise dos perfis mostra que os primeiros 4 metros da coluna de água têm dinâmica distinta das camadas inferiores e a comparação entre dados e resultados do modelo, mostra que o modelo captura essa dinâmica. Este resultado é consistente com a estratificação do escoamento residual e instantâneo e com o nível residual mais elevado detetado no interior da baía e com a mistura entre as duas camadas posta em evidência pelo corte vertical do perfil instantâneo.

A Figura 9 mostra a distribuição superficial de temperatura calculada pelo modelo para o dia 25 de junho às 12 horas. A figura mostra valores de temperatura superficial mais baixos na baía, como consequência do upwelling.

O padrão de circulação apresentado para junho de 2014 repete-se ao longo do ano, uma vez que o regime de ventos apresenta regularmente uma componente de velocidade de oeste. A Figura 10 mostra campos de velocidades instantâneos à superfície e a Figura 11 no fundo para o dia 24 de Agosto de 2014. A figura mostra que o escoamento forçado pelo vento e pela densidade predomina sobre o escoamento de maré, com velocidades da ordem dos 30 cm/s, cerca de seis vezes superiores à velocidade induzida pela maré. O mesmo tipo de solução é mostrado na Figura 12 e Figura 13 para o dia 2 de dezembro de 2014. O padrão é idêntico, embora as temperaturas sejam mais elevadas, como consequência da estação do ano. Em ambas as figuras, o escoamento superficial é dirigido para fora da baía, embora por vezes a velocidade à superfície seja dirigida preferencialmente para a margem continental, promovendo o afundamento de água nessa zona. A comparação destas figuras

com a velocidade residual representada na Figura 6 mostra que a componente dirigida para fora da baía é da ordem dos 2 cm/s, significando que o tempo de residência na camada superficial é no mínimo de 2 dias.

Os campos de correntes foram usados para calcular tempos de residência à semelhança do que foi feito em Evaristo *et al.* (2021) com as velocidades de maré. Naquele trabalho os autores verificaram que se a maré fosse o principal mecanismo responsável pela renovação da água da Baía, os tempos de residência seriam da ordem dos meses. Se assim fosse, a qualidade da água na Baía teria de ser muito inferior à existente, atendendo às pressões decorrentes das águas residuais urbanas, indústrias e atividade portuária.

Neste estudo foi repetido o mesmo procedimento. A Baía foi dividida em 3 caixas que foram preenchidas com traçadores lagrangeanos seguindo o procedimento proposto por Braunschweig *et al.* e (2003) e verificado mais tarde por Ascione *et al.* (2012), respetivamente no estuário do Tejo e no estuário do Mondego. A Figura 14 mostra as caixas de emissão à esquerda e a localização das traçadoras 30 dias mais tarde, à direita. A figura mostra que a generalidade dos traçadores já saiu do domínio. A Figura 15 mostra a evolução temporal da percentagem de traçadores ainda no interior da Baía. A figura mostra que a o tempo de residência dos traçadores da caixa 3 é da ordem de quatro dias e que o tempo de residência dos traçadores da caixa 1 é da ordem dos 20 dias. A Figura 15 mostra também que nos primeiros 2 dias a percentagem de traçadores baixa significativamente (respetivamente 60% e 40% dos da caixa intermédia e da mais interior saem em 2 dias). Isto significa que existe mistura vertical e que alguns dos traçadores voltam a entrar para o interior da baía através do escoamento de fundo.

As descargas com maior probabilidade de saírem são as associadas a água doce. Isto explicaria a inexistência de relatos de poluição permanente no interior da Baía associada a descargas permanentes.

### Análise e Discussão dos Resultados

A hidrodinâmica da Baía é condicionada pelo Maré, pelo vento e pelas trocas de calor, que condicionam a densidade da água. Evaristo *et al.* (2021) mostrou que a maré determina o nível, mas não pode ser o principal mecanismo gerador de escoamento. A análise do regime de ventos mostrou que os ventos dominantes de Oeste deverão desempenhar papel determinante na hidrodinâmica da Baía. Sendo o vento dominante de Oeste é de esperar que o escoamento à

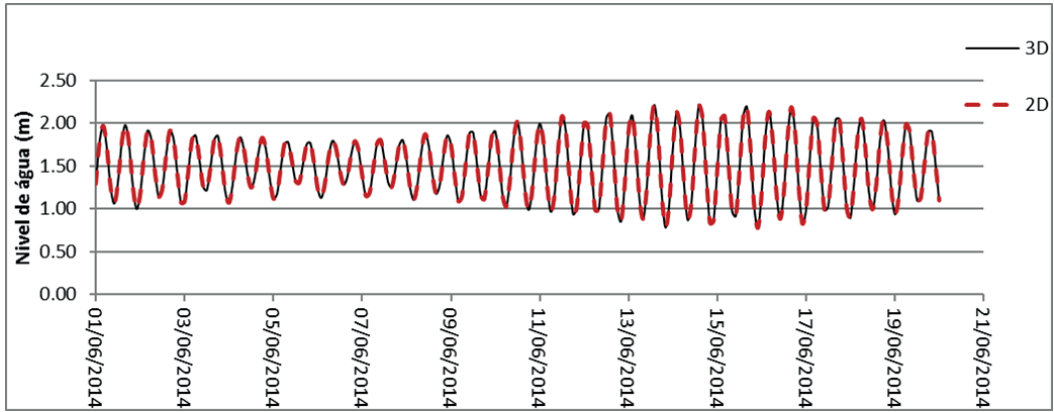


Figura 5 Nível da água na Baía simulado durante o mês de junho pelos modelos 2D e 3D. A concordância dos níveis mostra que o nível só é sensível à maré.

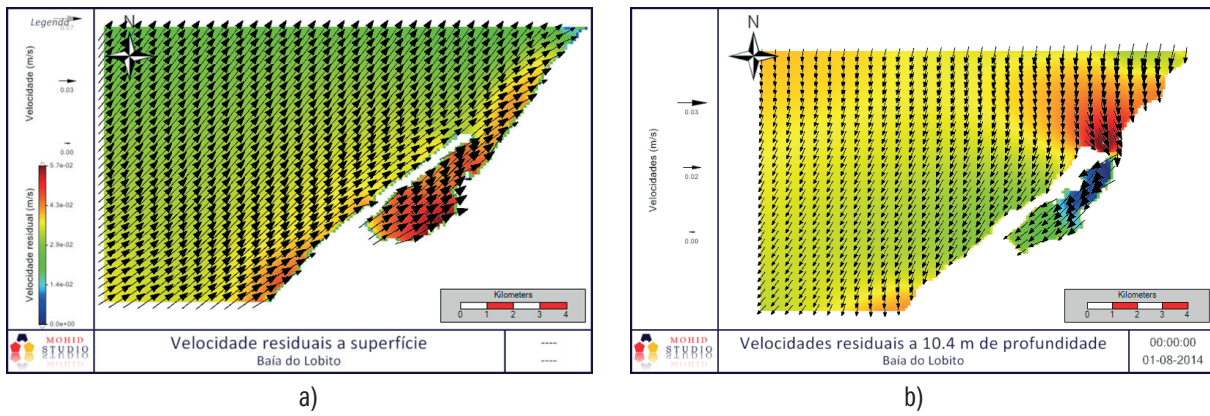


Figura 6. Campos de nível e de velocidade residuais à superfície e no fundo durante o mês de junho de 2014. As figuras mostram que à superfície o escoamento para fora da baía e que no fundo é dirigido para o seu interior e que os níveis no interior da Baía são ligeiramente superiores aos níveis fora da Baía.

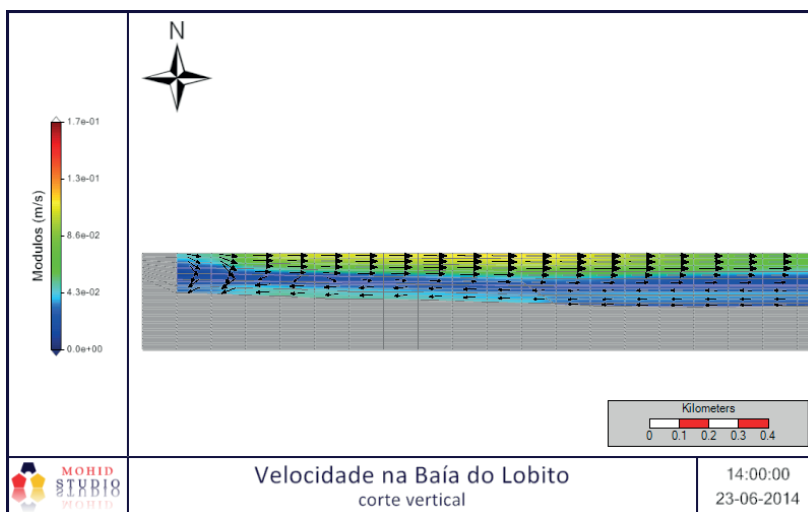


Figura 7. Corte vertical do campo de velocidades ao longo do eixo da Baía no dia 23 de Junho de 2014 às 14 horas. A água entra na metade inferior da coluna de água e sai na metade superior.



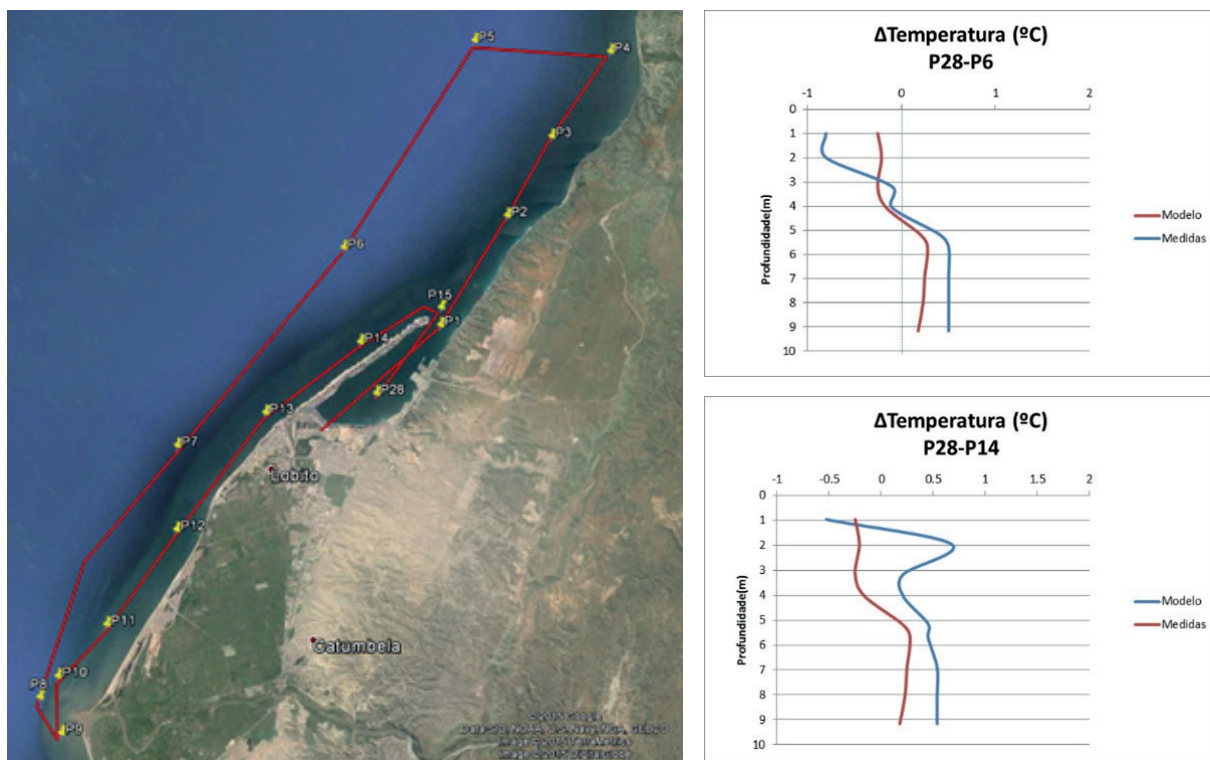


Figura 8. Locais de realização de perfis verticais de temperatura na zona da Baía do Lobito em junho de 2014 (esquerda). As linhas das figuras à direita mostram as diferenças entre os perfis medidos nas estações 28 e 6 e nas estações 28 e 14 e diferenças entre os perfis calculados nos mesmos pontos.

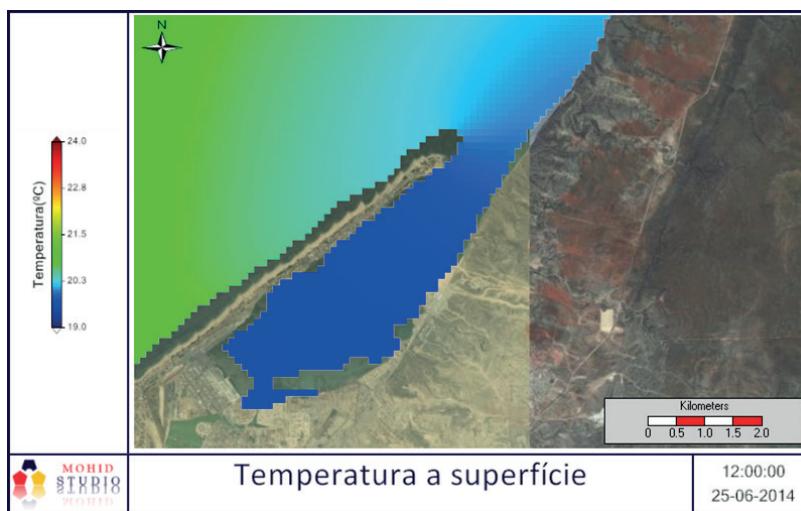


Figura 9. Temperatura à superfície prevista pelo modelo para as 12 horas do dia 25 de junho de 2014 pondo em evidência o processo de upwelling no interior da Baía associado ao vento de oeste.

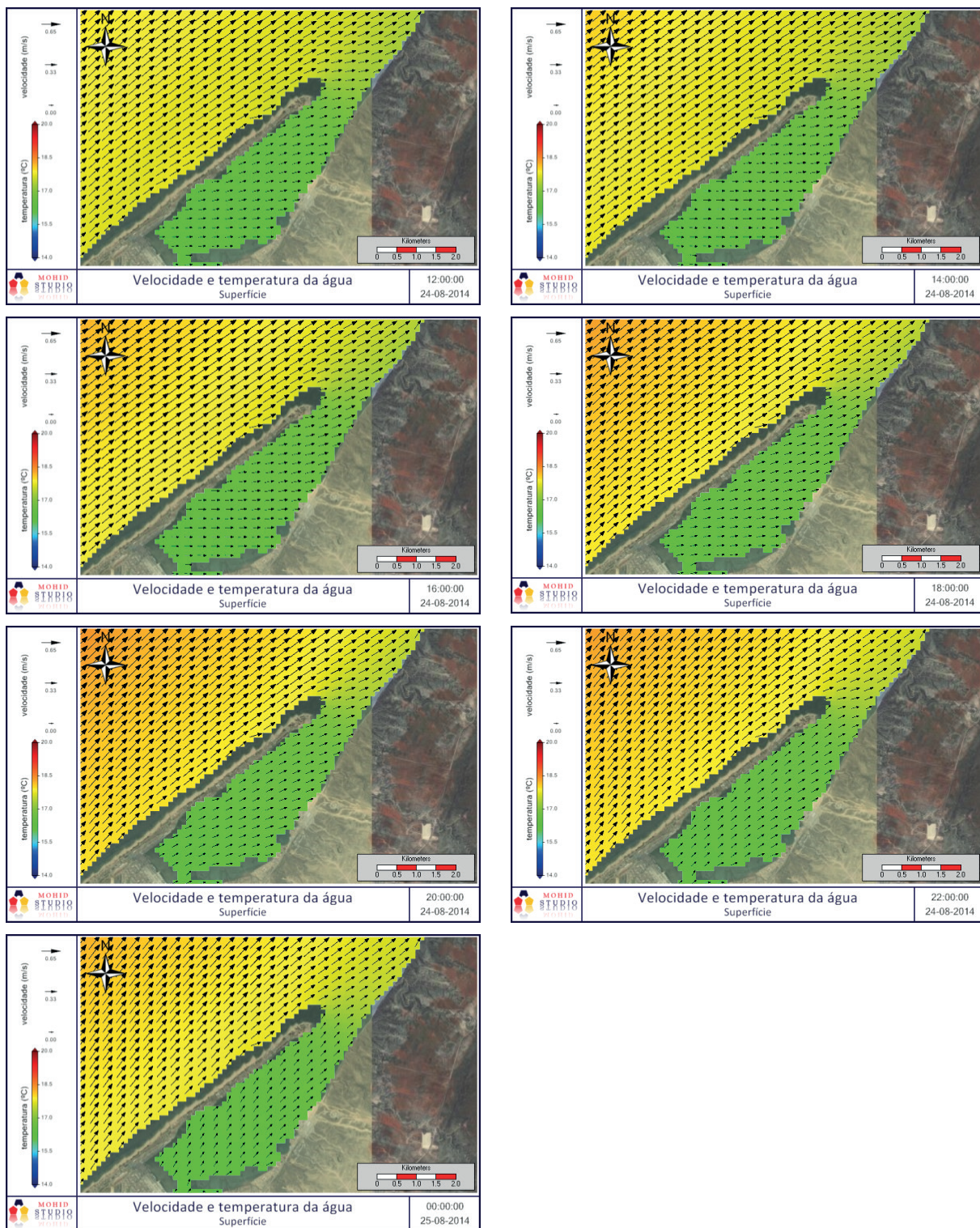


Figura 10. Correntes superficiais instantâneas (vetores) e campo de temperatura (cores) na Baía do Lobito para o dia 24 agosto de 2014 ao longo de 16 horas.

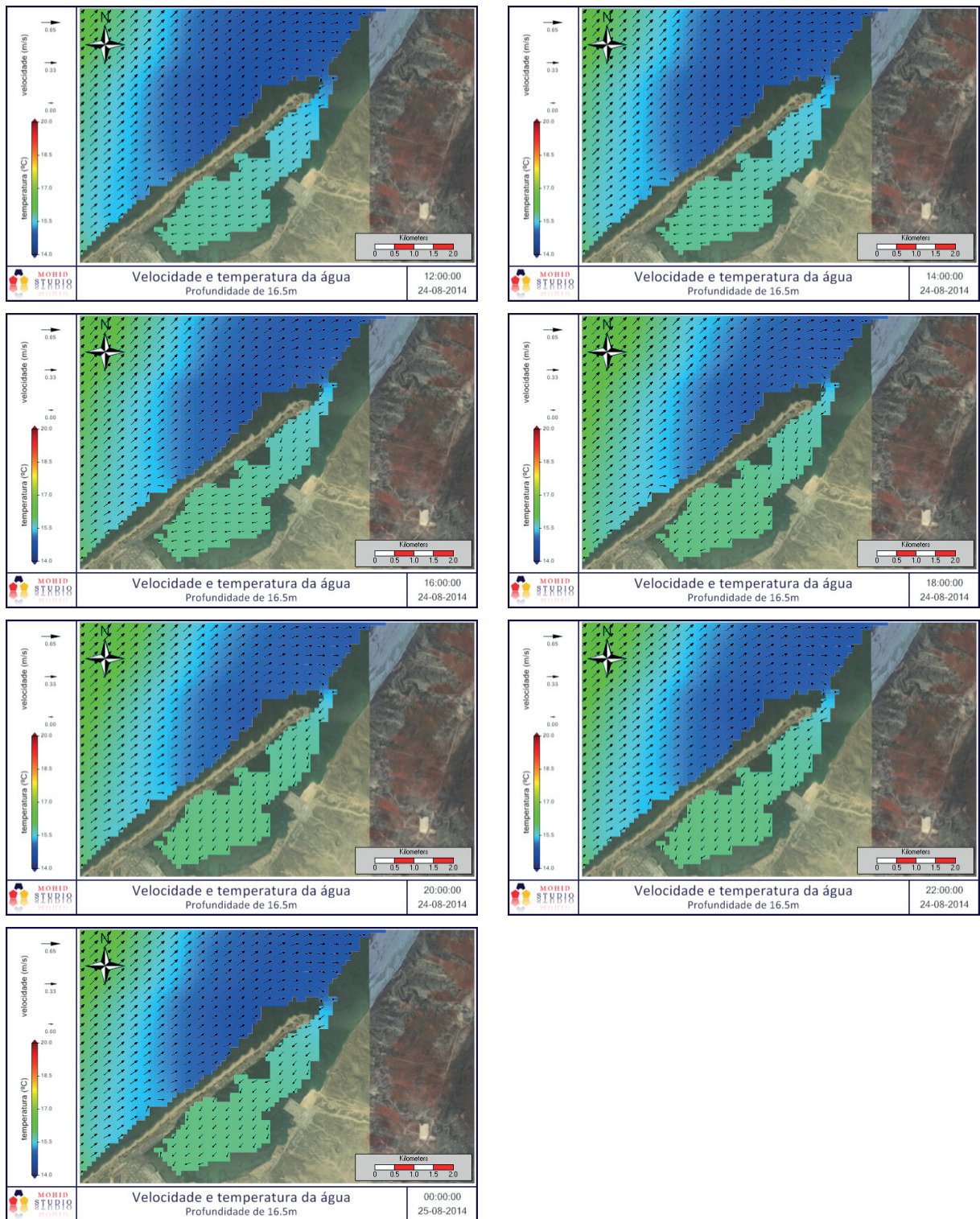


Figura 11. Correntes instantâneas (vetores) e campo de temperatura em profundidade na Baía do Lobito no dia 24-08 de 2014 ao longo de 16 horas.

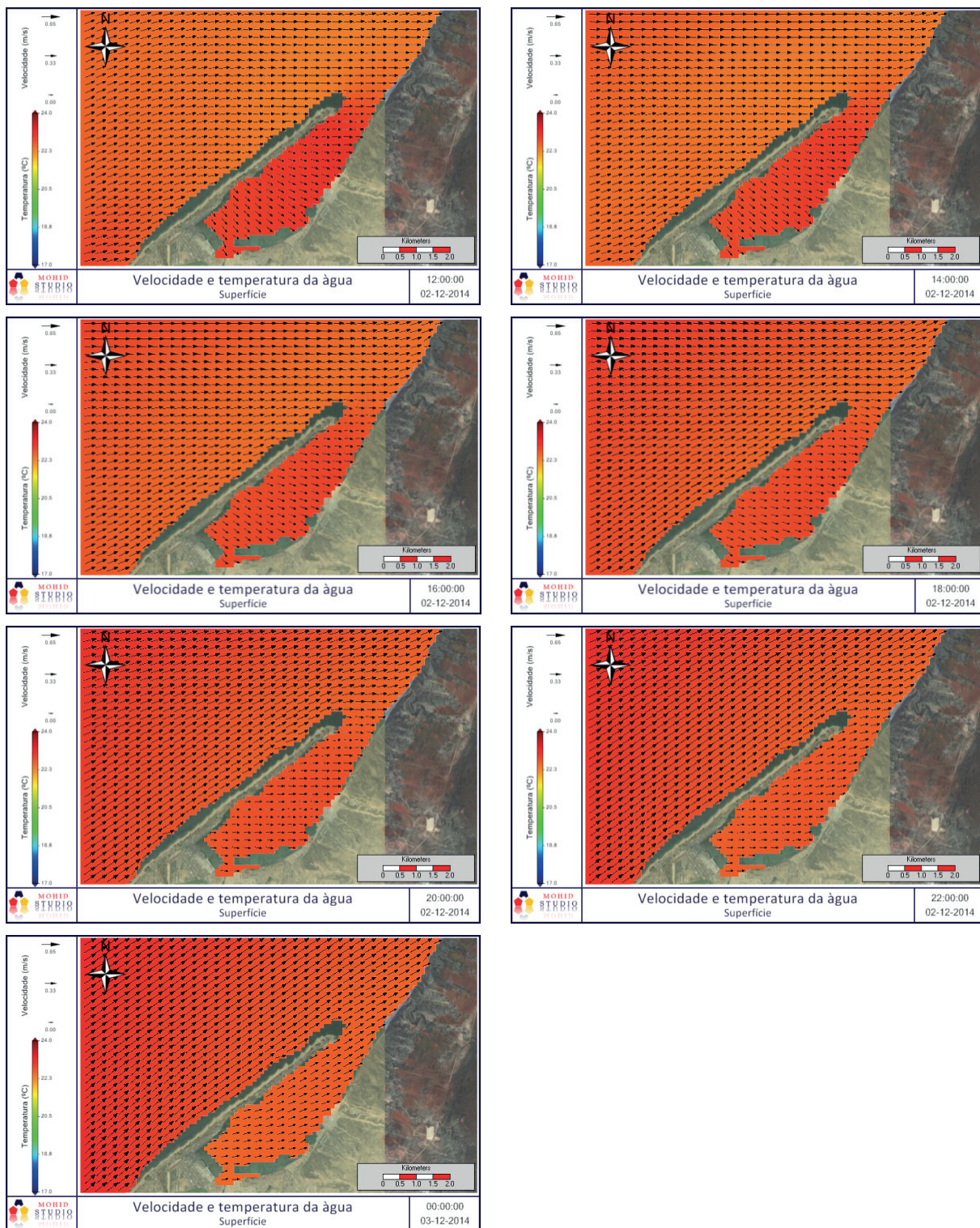


Figura 12. Correntes (vetores) superficiais instantâneas e campo de temperatura (cores) na Baía do Lobito dias 2-12 de 2014 ao longo de 16 horas.

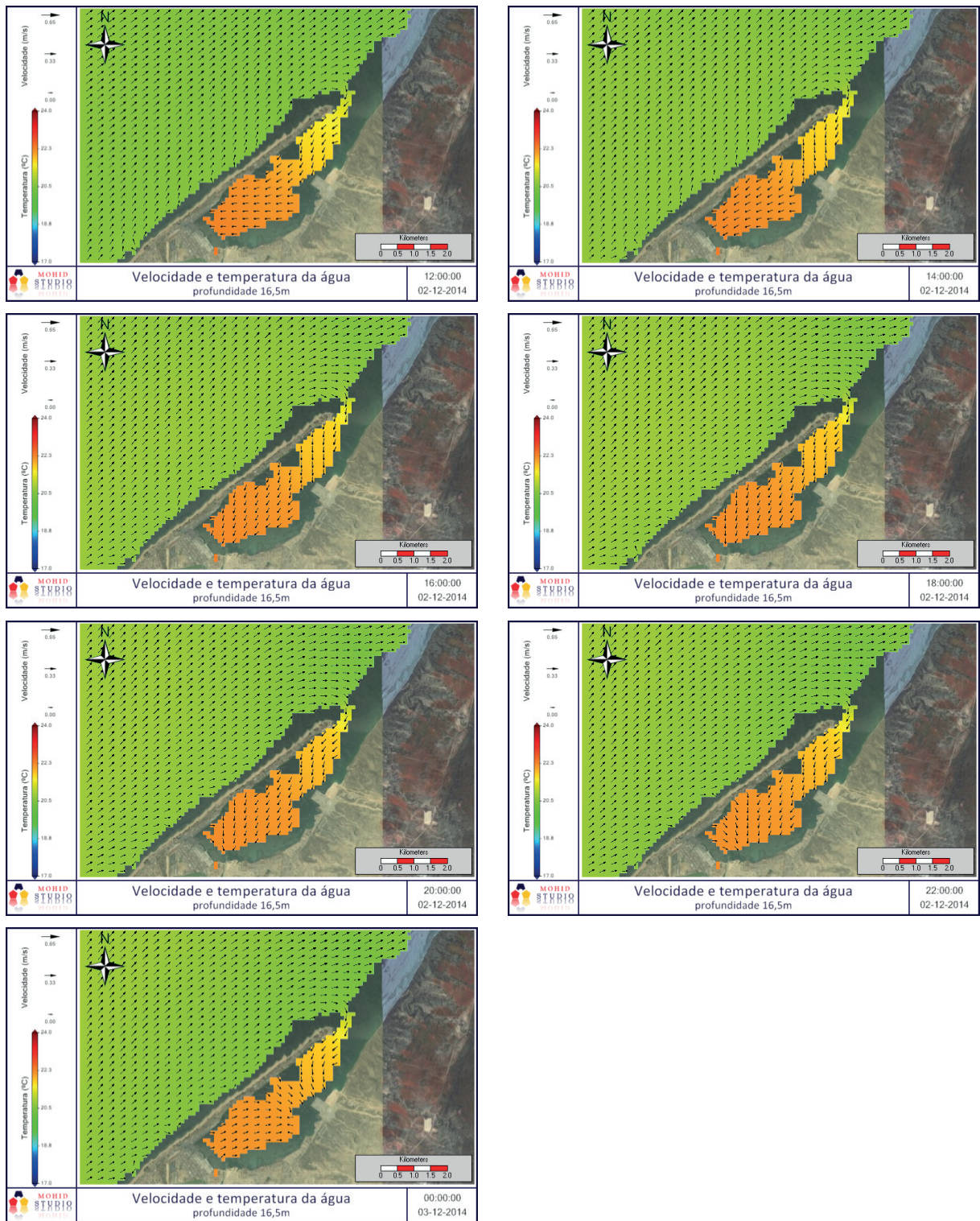


Figura 13. Correntes (vetores) superficiais instantâneas e campo de temperatura (cores) na Baía do Lobito dias 2-12 de 2014 ao longo de 16 horas

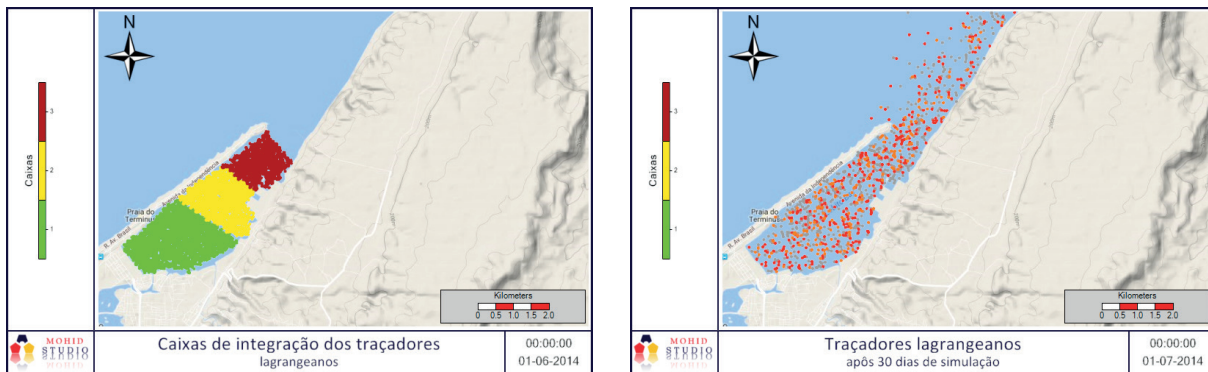


Figura 14. Caixas de emissão (3) dos traçadores Lagrangeanos e localização dos traçadores 30 dias depois da emissão.

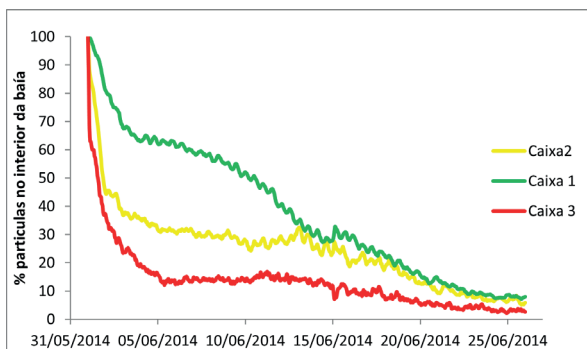


Figura 15. Evolução temporal da percentagem de traçadores no interior da Baía, os emitidos em cada uma das caixas da Figura 14. Os traçadores foram emitidos nos primeiros 2 m da coluna de água medidos a partir da superfície. 80% dos traçadores da caixa 1 precisam de cerca de 20 dias para saírem.

superfície seja dirigido predominantemente para fora da Baía e conseqüentemente que o escoamento no fundo seja orientado preferencialmente para o seu interior. Este foi efetivamente o padrão de circulação encontrado e originaria níveis dentro da Baía inferiores aos níveis exteriores se a temperatura no interior da Baía fosse idêntica à temperatura no seu exterior. Na realidade a temperatura média na coluna de água no interior da Baía é mais elevada do que no exterior e isso permite que os níveis sejam mais elevados cerca de 0.5 mm. À superfície da Baía a temperatura é efetivamente inferior à temperatura no exterior como consequência do upwelling, no entanto a circulação em duas camadas origina mais mistura vertical no interior do que no exterior e por isso a temperatura média no interior é superior à temperatura no exterior, permitindo que no fundo a pressão seja inferior gerando um escoamento dirigido de fora para dentro.

Em situações de vento noroeste o forçamento superficial é dirigido para o interior da Baía. Este efeito associado à estratificação térmica contribuirá para a retenção da água no seu interior, especialmente da água menos salina proveniente das descargas terrestres ricas em nutrientes. Nessas alturas é de esperar deterioração da qualidade da água no seu interior. A importância deste processo depende da intensidade do vento e da duração destes eventos e deverá ser abordada com base em modelação biogeoquímica, preferencialmente orientada para a reprodução de eventos quantificados com dados de campo.

## 5. CONCLUSÕES

A aplicação do modelo hidrodinâmico tridimensional à Baía do Lobito permitiu simular e conhecer os campos de velocidade transiente e residual na Baía e região envolvente e estimar os tempos de residência nas diferentes partes da baía. Os resultados mostraram que o vento determina a dinâmica na baía, sendo o seu efeito visível no padrão de escoamento e quantificável através dos tempos de residência.

Este estudo representa um primeiro passo para a compreensão da circulação na Baía do Lobito, cujo conhecimento deve suportar o ordenamento do território necessário à preservação de todas as atividades económicas que dependem da qualidade da água, nomeadamente o turismo. A confirmação exhaustiva dos resultados necessita de mais trabalho de campo, nomeadamente da medição de correntes. A importância do vento mostra também que o estudo da baía pode beneficiar de um melhor conhecimento da circulação atmosférica e por isso da existência de um modelo local de alta definição.

Os resultados das simulações realizadas são também de grande importância para o planeamento do trabalho de campo e para a minimização dos seus custos. A metodologia seguida baseada no downscaling de dados de domínio público produzidos por programas de escala global (GPS, CMEMS, ETOPO, EMODNET) mostra ser adequada para o estudo de sistemas pouco estudados experimentalmente, permitindo um progresso muito mais rápido (e económico) do que acontecia no passado. Nessa altura, o trabalho de campo efetuado no local era necessariamente o primeiro passo para o estudo de um sistema costeiro.

## REFERÊNCIAS

- Ascione Kenov, I; Garcia AC; Neves R. (2012). Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal)". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106:13-22. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.04.008.
- Braunschweig, F.; Martins, F.; P. Leitão; Neves, R. (2003). A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*. 53: 137-145. DOI: 10.1007/s10236-003-0040-0.
- Coelho, H.; Neves, R.; Leitão, P.; Martins, H.; Santos, A. (1999). The slope current along the western European margin: A numerical investigation. *Bol. Inst. Esp. Oceanografia* (ISSN: 0074-0195), 15(1-4): 61-72.
- De Pablo H, Sobrinho J, Garcia M, Campuzano F, Juliano M. (2019). Validation of the 3D-MOHID Hydrodynamic Model for the Tagus Coastal Area. *Water*. 2019; 11: 1-21. DOI: 10.3390/w11081713.
- Evaristo, A.; Pinto, L.; Kenov, I.A.; Neves, R. (2020). Hidrodinâmica da Baía do Lobito. Parte I - Correntes de maré. *Revista de Gestão Costeira Integrada/Journal of Integrated Coastal Zone Management* 21(2): 97-106. DOI 10.5894/rgci-n406.
- Figueiredo, D; Dos Santos, A; Mateus M; Pinto, L. (2018). Hydrodynamic modelling of Port Foster, Deception Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 30(2), 115-124. DOI: 10.1017/S0954102017000463115-124.
- Gaspar, R.; Marques, L.; Pinto, L.; Baeta, A.; Pereira, L.; Martins, I., Marques, J.C.; Neto, J.M. (2017). Origin here, impact there – The need of integrated management for river basins and coastal areas. *Ecological Indicators*, 72: 794-802. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.013.
- Lopes, J.F.; Cardoso, A.C.; Moita, M.T.; Rocha, A.C.; Ferreira, J.A. (2009). Modelling the temperature and the phytoplankton distributions at the Aveiro near coastal zone, Portugal. *Ecological modelling*. 2009, Vol. 220, pp. 940-961. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.024.
- Malhadas, M.S.; Neves, R.; Leitão, P.C.; Silva, A. (2010). Influence of tide and waves on water renewal in Óbidos Lagoon, Portugal. *Ocean Dynamics* 60:41-55. DOI: 10.1007/s10236-009-0240-3.
- Martins, F.; Leitão, P.; Silva, A.; Neves, R. (2001). 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*. 2001; 24(1):51-62. DOI: 10.1016/S0399-1784(01)00092-5.
- Mateus, M. , G. Riflet , P. Chambel , L. Fernandes , R. Fernandes , M. Juliano , F. Campuzano , H. de Pablo, and R. Neves (2012). An operational model for the West Iberian coast: products and services, *Ocean Sci.*, 8, 713-732, 2012. DOI:10.5194/os-8-713-2012.
- Neves, R. (2013). *The Mohid Concept. In: Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. Eds. M. Mateus & R. Neves, pp 1-11. ISBN: 978-989-8481-24-5. Available on-line at [http://www.mohid.com/PublicData/Products/BookPapers/2013\\_mohidbook\\_C01.pdf](http://www.mohid.com/PublicData/Products/BookPapers/2013_mohidbook_C01.pdf).
- Saraiva, S., Pina, P., Martins, F., Santos, M., Braunschweig, F. R. Neves (2007). Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries. *Hydrobiologia*, 587, 5-18. DOI:
- Trancoso, A.R.; Saraiva, S.; Fernandes, L.; Pina, P.; Leitão, P.; Neves, R. (2005). Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary". *Ecological Modelling*, 187(2-3): 232-246. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.054.
- Vaz, N.; Dias, J.; Leitão, P.; Martins, I. (2005). Horizontal patterns of water temperature and salinity in an estuarine tidal channel: Ria de Aveiro. *Ocean Dynamics*, 55, 416-429. DOI: 10.1007/s10236-005-0015-4.
- Vaz, N.; Vaz, L.; Seródio, J.; Dias, J.M. (2019). A modeling study of light extinction due to cohesive sediments in a shallow coastal lagoon under well mixed conditions. *Science of The Total Environment*, Volume 694, 133707. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133707.