

A INFLUÊNCIA DOS FORÇAMENTOS NA CIRCULAÇÃO E NO TRANSPORTE NA RIA FORMOSA

João FABIÃO ⁽¹⁾; Marta RODRIGUES ⁽²⁾; José JACOB ⁽³⁾; Alexandra CRAVO ⁽⁴⁾, Sara CARDEIRA ⁽⁵⁾; André FORTUNATO ⁽⁶⁾; Alberto AZEVEDO ⁽⁷⁾; Nicolas BRUNEAU ⁽⁸⁾

A Ria Formosa é um sistema lagunar localizado no Sul de Portugal, sendo um ecossistema de elevada produtividade biológica e diversidade ecológica. A caracterização dos padrões de circulação e de transporte na Ria Formosa, em particular as trocas com o oceano adjacente através das barras, a influência das marés e de outros forçamentos ambientais, são essenciais para a compreensão da dinâmica deste ecossistema. Os dados adquiridos nas campanhas do projecto COALA permitiram validar o modelo hidrodinâmico SELFE, que mostrou uma boa capacidade de representar os padrões de circulação da Ria. A circulação e o transporte foram analisados com o modelo lagrangeano VELApert, simulando cenários sujeitos a diferentes forçamentos (vento, batimetria e caudais de água doce). Os resultados sugerem uma influência significativa da direcção do vento e da batimetria na quantidade de partículas exportadas para o exterior a escalas temporais curtas, a qual depende da barra de origem das partículas. Existe também uma influência do vento e da batimetria nas barras pelas quais as partículas são exportadas e na sua distribuição espacial. Estes resultados, complementados com os dados obtidos nas campanhas do projecto COALA, contribuirão para melhorar o conhecimento da dinâmica de trocas entre a Ria e a zona costeira adjacente.

Palavras-chave: batimetria, descargas de água doce, malhas não estruturadas, modelação numérica, modelos lagrangeanos, vento.

⁽¹⁾ Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, jfabiao@Inec.pt

⁽²⁾ Bolseira de Pós-Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, mfrdrigues@Inec.pt

⁽³⁾ Professor Auxiliar, CIMA, Universidade do Algarve, jjacob@ualg.pt

⁽⁴⁾ Professora Auxiliar, CIMA, Universidade do Algarve, acravo@ualg.pt

⁽⁵⁾ Bolseira de Investigação, CIMA, Universidade do Algarve, cardeira_sara@hotmail.com

⁽⁶⁾ Investigador Principal com Habilitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, afortunato@Inec.pt

⁽⁷⁾ Bolseiro de Pós-Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, aazevedo@Inec.pt

⁽⁸⁾ Consultor, Anteriormente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, bruneau.n@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A Ria Formosa é um ecossistema de elevada produtividade biológica e diversidade ecológica, reunindo vários estatutos de protecção nacionais e internacionais. Para além do interesse ambiental, a Ria Formosa tem grande importância económica para a população da região. O conhecimento e caracterização dos padrões de circulação e de transporte na Ria Formosa, em particular as trocas com o oceano adjacente através das barras e a influência das marés e de outros forçamentos ambientais, são, assim, essenciais para a compreensão da dinâmica deste ecossistema. O projecto COALA, «*Dinâmica dos nutrientes e da matéria particulada – trocas entre uma lagoa costeira e o oceano adjacente através de um sistema de múltiplas barras: o caso da Ria Formosa, sul de Portugal*», visa contribuir para este objectivo, combinando a aquisição de dados com a modelação numérica de elevada resolução.

A Ria Formosa, localizada na costa Sul de Portugal, é um sistema lagunar com cerca de 80 km² de área, 55 km de comprimento (Este-Oeste) e 6 km de largura máxima. É delimitada exteriormente por um cordão dunar de ilhas barreira com mais de 50 km de comprimento e possui seis ligações permanentes ao oceano — barras do Ancão, Faro-Olhão, Armona, Fuzeta, Tavira e Lacém —, que contribuem para uma grande renovação de água no seu interior. Em particular, cerca de 90% do volume de água é trocado no sector oeste (Figura 1) (Jacob *et al.*, 2013). A laguna, com uma profundidade média de aproximadamente 2 metros, encontra-se preenchida por sapais, salgados, vasas, bancos de areia e canais. A Ria Formosa é um sistema meso-mareal com uma amplitude média de maré de cerca de 2 m, variando entre 1,5 m e 3,5 m, dominada pelas constituintes semi-diurnas da maré. Devido à reduzida entrada de água doce e à predominância do efeito de maré na circulação, é considerado um sistema verticalmente bem misturado, sem evidência de estratificação salina ou térmica (Newton e Mudge, 2003; Pacheco *et al.*, 2010; Jacob *et al.*, 2012).



Figura 1. Sector oeste da Ria Formosa, com a localização das barras e dos pontos do Cais Comercial de Faro e da Ilha Deserta (fonte: Google Maps).

A influência da maré na hidrodinâmica da Ria Formosa e nas dinâmicas das suas barras, assim como as trocas entre a Ria e o oceano adjacente, foram já objecto de diversos estudos, nomeadamente os trabalhos de Salles (2001), Salles *et al.* (2005), Dias *et al.* (2009), Pacheco *et al.* (2010) e Jacob *et al.* (2012).

No presente trabalho apresenta-se a caracterização dos padrões de circulação e de transporte na Ria Formosa, sob diferentes condições de forçamento, tendo em vista contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica do ecossistema. Numa primeira fase, simulou-se a circulação na Ria Formosa com recurso a um modelo hidrodinâmico. Em seguida, através de um modelo lagrangeano de transporte, estudou-se a influência de diversos forçamentos nas trocas de massa de água em diferentes zonas de interesse do sector oeste da Ria Formosa. A estrutura do trabalho reflecte esta abordagem metodológica: o capítulo 2 descreve os modelos numéricos utilizados, o capítulo 3 apresenta a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, o capítulo 4 analisa os resultados dos cenários simulados e, por fim, o capítulo 5 discute as principais conclusões.

2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

2.1 Modelo Hidrodinâmico – SELFE

A hidrodinâmica lagunar foi simulada com o modelo hidrodinâmico SELFE — *Semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element* (Zhang e Baptista, 2008). Trata-se de um modelo de malhas não-estruturadas, desenvolvido para a simulação da circulação baroclínica a diferentes escalas espaciais, desde o rio até ao oceano. O SELFE faz parte de um sistema completo de modelos que inclui ainda módulos de agitação marítima (Roland *et al.*, 2012; Dodet *et al.*, 2013), dinâmica de ecossistemas (Rodrigues *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2012), contaminação fecal (Rodrigues *et al.*, 2011), dinâmica sedimentar (Pinto *et al.*, 2012), e de hidrocarbonetos (Azevedo *et al.*, 2009, Azevedo *et al.*, 2014), entre outros.

Este modelo calcula a elevação da superfície livre e os campos tridimensionais de velocidade, salinidade e temperatura, resolvendo as equações tridimensionais de águas pouco profundas, as quais consideram as aproximações hidrostática e de Boussinesq. O modelo inclui ainda um módulo de transporte que permite ao utilizador simular um conjunto de traçadores genéricos, para além da salinidade e da temperatura. Relativamente à formulação numérica, o SELFE resolve o sistema de equações diferenciais através de esquemas de elementos finitos e volume finitos. A todas as equações são aplicados esquemas semi-implícitos, permitindo melhorar a estabilidade e maximizar a eficiência. As equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento são resolvidas em simultâneo, o que permite ultrapassar as condições de estabilidade mais restritivas (e.g., associadas ao número de Courant). Para a resolução dos termos advectivos nas equações da conservação de quantidade de movimento, o SELFE utiliza um método Euleriano-Lagrangeano (ELM). Os termos advectivos nas equações de transporte podem ser resolvidos com métodos ELM, *upwind* de volumes finitos (FVUM) ou Total Variation Diminishing (TVD). Para a discretização do domínio de cálculo, o SELFE utiliza malhas triangulares não estruturadas na direcção horizontal e coordenadas híbridas na vertical (coordenadas S e coordenadas Z). A utilização de coordenadas híbridas S e Z permite uma maior flexibilidade na representação da batimetria.

A descrição detalhada do modelo hidrodinâmico encontra-se em Zhang e Baptista (2008).

3.2 Modelo Lagrangeano – VELApart

O VELApart é um modelo bidimensional (2D) e quasi-tridimensional (quasi-3D) para simular as trajetórias de partículas em águas superficiais. Com base no cálculo das trajetórias, este modelo permite também estimar tempos de residência para dois tipos distintos de traçadores e calcular erros de fecho (Oliveira e Fortunato, 2002). Na versão 2D utilizada neste estudo, para um campo de velocidades médias na vertical, o modelo resolve a equação de transporte na forma não-conservativa para partículas individuais:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(HD \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + Q \quad (1)$$

em que:

- c – concentração ([massa]/m³)
- (x, y) – coordenadas cartesianas horizontais (m)
- u_i – componentes horizontais da velocidade média na vertical (ms⁻¹)
- H – profundidade total (m)
- D – coeficiente de difusão (m²s⁻¹)
- Q – termo de fontes e sumidouros
- t – tempo (s).

A descrição detalhada do modelo lagrangeano encontra-se em Oliveira e Fortunato (2002).

3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

3.1 Setup do Modelo

Para calibração e validação do modelo hidrodinâmico SELFE, realizaram-se inicialmente diversas simulações em modo bidimensional. Esta aplicação baseou-se na aplicação anterior do modelo ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004) à Ria Formosa, de Portela *et al.* (2011). Feita a calibração e validação do modelo em modo bidimensional, estendeu-se o funcionamento do modelo ao modo tridimensional barotrópico, já que a Ria Formosa é considerada um sistema verticalmente bem misturado (Newton e Mudge, 2003; Pacheco *et al.*, 2010; Jacob *et al.*, 2012).

O domínio horizontal foi discretizado numa malha com 90 000 nós e 177 000 elementos, com resolução espacial variável entre 10 m e 6 km. A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada por comparação com dados históricos de níveis de 1979 e 1980, tendo a validação sido realizada por comparação com dados de níveis e velocidades obtidos no decurso das campanhas do projecto COALA. Para a simulação de calibração utilizou-se informação batimétrica de 1980, contemporânea dos dados disponíveis, a qual cobre toda a extensão da Ria Formosa. Por sua vez, para a validação do modelo hidrodinâmico adoptou-se uma malha de cálculo com informação batimétrica actualizada em certas zonas com dados mais recentes (2001, 2003, 2004, 2008 e 2010), combinados localmente com informação adaptada de fotografia aérea (conforme descrito em Portela *et al.*, 2011). Relativamente à discretização do domínio vertical, após uma fase preliminar em que se

testaram diversas combinações, utilizou-se uma malha vertical com 7 níveis S até aos 100 m de profundidade e 4 níveis Z entre os 100 e os 767 m.

Quanto ao atrito do fundo, em modo tridimensional o modelo SELFE permite contabilizar este factor de duas formas distintas: através da rugosidade do fundo (em metros) ou directamente através do coeficiente de arrastamento. Realizaram-se diversas simulações com parametrizações distintas. Tendo em conta os resultados, admitiu-se a rugosidade do fundo variável no domínio horizontal, com valores estimados a partir da distribuição espacial do coeficiente de Manning para a qual o modelo foi calibrado no modo bidimensional, baseada na caracterização da ocupação do solo presente nos mapas CORINE Land Cover de 2006, utilizando para isso a fórmula proposta por Zheng *et al.* (2013).

O modelo foi forçado pela maré na fronteira oceânica. Utilizaram-se 14 constituintes de maré (Z0, MSF, Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, MN4, M4, MS4 e M6), determinadas a partir de um modelo regional baseado em Bertin *et al.* (2012). Tendo em consideração que no presente estudo se pretende analisar a influência do vento, realizou-se uma simulação adicional com o forçamento atmosférico devido ao vento. Nesse caso, o modelo foi forçado com as condições de vento verificadas nos dias das campanhas de Outono 2011 do projecto COALA, medidas na estação meteorológica do Aeroporto de Faro com intervalos de 30 minutos. Definiu-se o passo de cálculo em 15 s. O modelo foi iniciado a partir de uma situação de repouso, considerando um período de adaptação de dois dias.

3.2 Comparação com dados históricos (1979-1980)

A calibração do modelo foi realizada essencialmente por comparação com dados de uma campanha exaustiva conduzida pelo Instituto Hidrográfico entre 1979 e 1980. Os dados, descritos em Dias *et al.* (2009), incluem medições de níveis num conjunto de 11 estações (5 localizadas no interior da Ria e nas barras, e 6 na zona costeira exterior – Figura 2). Estes dados foram sintetizados para 8 constituintes de maré (MSF, O1, K1, M2, S2, M4, MS4, M6). Os resultados de todas as simulações, sintetizados para as constituintes de maré anteriormente referidas, foram comparados com dados sintetizados.

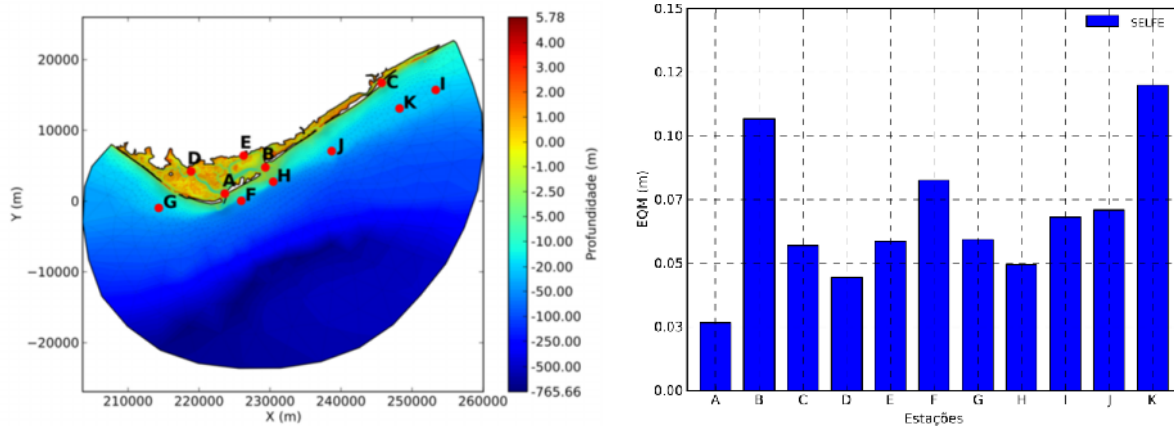


Figura 2. (a) Estações utilizadas na calibração do modelo hidrodinâmico; (b) Erro quadrático médio (EQM) dos níveis – comparação com os dados históricos de 1979/1980, séries sintetizadas para 8 constituintes de maré (MSF, O1, K1, M2, S2, M4, MS4, M6).

Os EQM obtidos variam entre 3 e 12 cm (Figura 2). Pode considerar-se que, em geral, os EQM revelam uma boa concordância entre o modelo e os dados de campo. Os erros são particularmente reduzidos (cerca de 5 cm) nas estações mais interiores (D e E, correspondentes ao Cais Comercial de Faro e à Lota de Olhão), evidenciando uma boa representação da circulação no interior da Ria Formosa. Estes erros são da mesma ordem de grandeza ou inferiores aos obtidos em aplicações anteriores na Ria Formosa, quer com o modelo SELFE em modo bidimensional, quer com o modelo ELCIRC (Dias *et al.*, 2009; Portela *et al.*, 2011). Refira-se, no entanto, que existem diferenças entre as simulações com o modelo SELFE e as simulações com o modelo ELCIRC, nomeadamente ao nível da malha de cálculo na aplicação de Dias *et al.* (2009), e da parametrização do coeficiente de atrito e do forçamento oceânico em ambas as aplicações. Para além das diferenças na parametrização, as principais melhorias observadas, nas estações localizadas no interior do domínio (D e E), podem também dever-se ao próprio modelo utilizado, dado que o SELFE representa de forma mais satisfatória a circulação em zonas estuarinas do que o modelo ELCIRC (Zhang e Baptista, 2008).

3.3 Comparação com dados das campanhas COALA (2011)

Para validação do modelo, utilizaram-se os dados obtidos através de diversas campanhas realizadas no Outono de 2011 no âmbito do projecto COALA. Estes dados correspondem às séries temporais de níveis do mar no Cais Comercial de Faro (CCF) e no cais da Ilha Deserta (IDE), para o período entre 15/10/2011 e 14/12/2011, e velocidades medidas nas principais secções em situações de maré viva e de maré morta (Figura 1). Esta comparação é realizada para as séries completas e para as séries de dados sintetizados para 11 constituintes de maré (MSF, O1, K1, N2, M2, S2, MN4, M4, MS4, M6, K2). Comparam-se os resultados com os obtidos em modo bidimensional com os modelos ELCIRC (Jacob *et al.*, 2013) e SELFE.

Os EQM dos níveis revelam uma boa concordância nos dois pontos em análise (Quadro 1). Em relação à simulação em modo bidimensional, no caso das séries completas observa-se uma redução do erro em 1,2 cm no ponto CCF, no interior da Ria, verificando-se um ligeiro aumento do EQM no ponto IDE, junto à barra de Faro-Olhão. Verifica-se a mesma tendência no caso das séries sintetizadas. No que se refere à simulação com o forçamento atmosférico, os resultados são muito semelhantes aos obtidos nas simulações sem vento. De qualquer forma, os erros encontram-se num intervalo considerado aceitável tanto em modo bidimensional como em modo tridimensional.

Quadro 1. Erro quadrático médio (EQM) dos níveis – comparação com dados das campanhas COALA (Outono de 2011). (CCF – Cais Comercial de Faro, IDE – Ilha Deserta).

EQM (cm)		Outono 2011	
		CCF	IDE
Séries completas	ELCIRC (2D)	12,3	8,3
	SELFE (2D)	12,1	8,0
	SELFE (3D)	10,9	8,7
Séries sintetizadas	ELCIRC (2D)	6,2	5,3
	SELFE (2D)	6,0	5,0
	SELFE (3D)	4,8	5,1

A Figura 3 representa os dados e os resultados do modelo para a velocidade média na secção da barra de Faro-Olhão e da Armona. Os resultados do modelo apresentam uma boa concordância com os perfis de velocidade medidos durante a campanha. Para a barra de Faro-Olhão, os EQM são de cerca de 17 cm/s para a situação de maré viva (24/11/2011) e 7 cm/s para a situação de maré morta (05/12/2011). Para a barra da Armona, os EQM são de cerca de 13 cm/s para a situação de maré viva (23/11/2011) e 8 cm/s para a situação de maré morta (06/12/2011). Os resultados sugerem que o modelo tende a sobrestimar as velocidades médias na barra da Armona e subestimar as velocidades médias na barra de Faro-Olhão, em particular em situações de maré viva (24/11/2011). Uma possível explicação para este fenómeno pode estar associada à batimetria utilizada, a qual em algumas zonas do domínio horizontal não é contemporânea dos dados, datando na zona da barra da Armona essencialmente de 1980. Vários estudos referem uma tendência de assoreamento da barra da Armona, ao longo das últimas décadas, que tem levado a uma perda de eficiência no escoamento (Vila-Concejo *et al.*, 2002, Pacheco *et al.*, 2010, Jacob *et al.*, 2013). Testes preliminares realizados com uma batimetria baseada nos levantamentos topográficos e batimétricos executados recentemente ao longo da costa portuguesa com equipamento LiDAR (Silva *et al.*, 2012), sugerem uma diminuição dos EQM para cerca de 11 cm/s em vez de 13 cm/s para a situação de maré viva na barra da Armona (Figura 3). Na barra de Faro-Olhão não se observam diferenças significativas entre ambas as batimetrias (Figura 3), o que pode ser justificado pela natureza da barra, artificialmente estabilizada há várias décadas, e pela origem da batimetria, relativamente recente (corresponde a levantamentos executados entre 2004 e 2008).

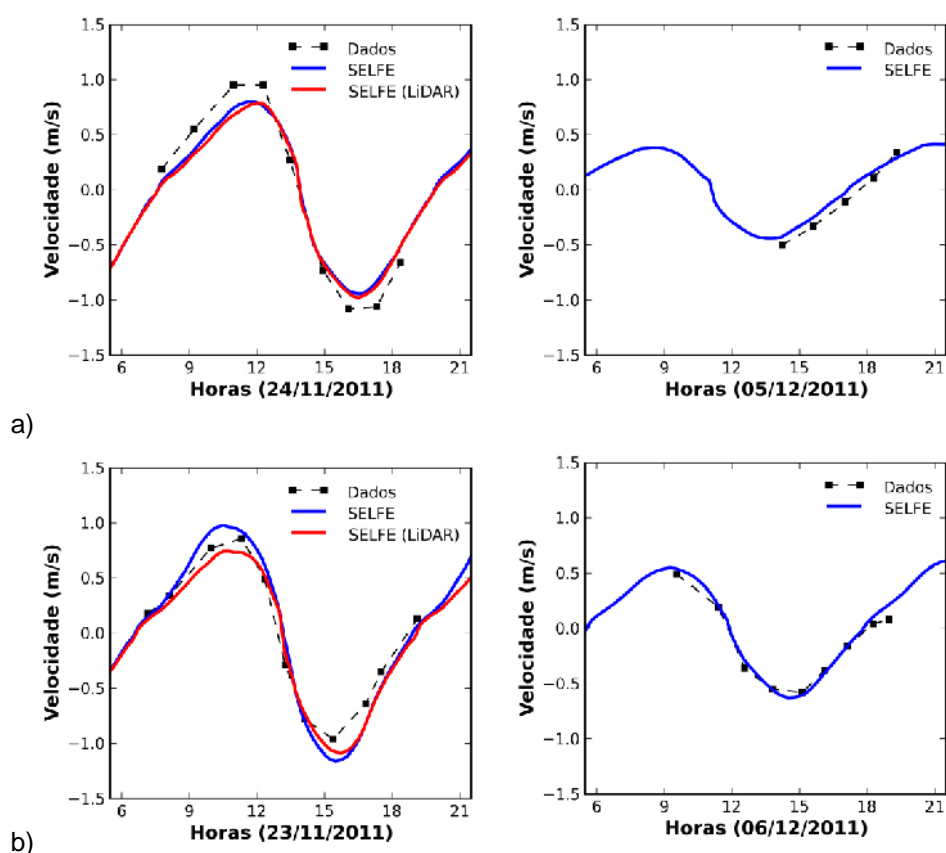


Figura 3. Velocidades médias durante as campanhas de Outono 2011 (azul) e resultados preliminares com a batimetria LiDAR (vermelho) nas a) barra de Faro-Olhão e b) barra da Armona. Os valores positivos representam a enchente e os valores negativos a vazante

Tendo em conta os resultados de níveis e velocidades, considera-se que o modelo representa adequadamente os principais padrões de circulação na zona em estudo.

4. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS FORÇAMENTOS NA CIRCULAÇÃO E NO TRANSPORTE

4.1 Definição de Cenários

Para analisar a influência dos forçamentos na circulação e no transporte dentro da Ria Formosa, foram simulados diversos cenários considerando diferentes forçamentos. Para além do cenário base com a simulação de referência (sem forçamento atmosférico, com batimetria de referência e sem caudais de água doce), simularam-se cenários variando o vento, a configuração batimétrica e o caudal descarregado por várias estações de tratamento de águas residuais (ETAR) localizadas na zona de estudo (Quadro 2). Relativamente ao forçamento atmosférico, recorreu-se aos dados estatísticos do vento, recolhidos na estação de Faro/Aeroporto entre 1970 e 1980, nos quais estão indicados os rumos mais frequentes e a velocidade média correspondente a cada um. De acordo com estes dados, consideraram-se 5 cenários: vento com rumo de Oeste (frequência de 20,9% e velocidade média de 16 km/h), de Noroeste (17,3% e 13,5 km/h), de Sudoeste (13,0% e 16,1 km/h), de Este (12,6% e 16,6 km/h) e de Norte (11,0% e 11,6 km/h). Quanto à

batimetria, consideraram-se dois cenários adicionais: o fecho hipotético da barra do Ancão e um cenário com informação batimétrica dos anos 80, a qual difere da batimetria utilizada no cenário de base. Por último, simulou-se a influência das descargas de quatro ETAR localizadas na zona de estudo (Faro-Noroeste, Faro-Nascente, Olhão-Poente e Olhão-Nascente) na circulação de partículas dentro do sistema. Consideram-se três cenários, para entrar em conta com o efeito da precipitação: caudais médios, e caudais 50% e 100% acima da média.

Quadro 2. Descrição dos cenários analisados.

Cenário	Variável	Descrição
0. Base	Base	Sem vento, sem caudal das ETARs, batimetria referência
1. WindW		Vento com rumo Oeste (16 km/h)
2. Wind_NW	Vento (constante em todo o domínio)	Vento com rumo Noroeste (13,5 km/h)
3. Wind_SW		Vento com rumo Sudoeste (16,1 km/h)
4. Wind_E		Vento com rumo Este (16,6 km/h)
5. Wind_N		Vento com rumo Norte (11,6 km/h)
6. Fecho BAN	Batimetria	Fecho da barra do Ancão
7. Anos 80		Batimetria dos anos 80
8. ETAR1	Caudal ETAR	Caudal médio (0,042 m ³ /s; 0,093 m ³ /s; 0,060 m ³ /s; 0,019 m ³ /s)
9. ETAR2		Aumento de 50% (0,063 m ³ /s; 0,1395 m ³ /s; 0,09 m ³ /s; 0,0285 m ³ /s)
10. ETAR3		Aumento de 100% (0,084 m ³ /s; 0,186 m ³ /s; 0,120 m ³ /s; 0,038 m ³ /s)

4.2 Setup das simulações

Para as simulações hidrodinâmicas correspondentes aos diferentes cenários, considerou-se uma parametrização muito semelhante à utilizada para a validação do modelo hidrodinâmico. No entanto, neste caso o forçamento de maré baseou-se em apenas 2 constituintes de maré (M2 e S2), determinadas com um modelo regional baseado em Bertin *et al.* (2012), de forma a representar o ciclo marés vivas / marés mortas.

Relativamente às simulações lagrangeanas, consideraram-se três conjuntos de partículas localizados junto das barras do sector oeste da Ria Formosa – Ancão, Faro-Olhão e Armona. Para o instante inicial da simulação, consideraram-se quatro fases distintas da maré: baixa-mar e meia-enchente, de marés vivas e de marés mortas. As situações de preia-mar e vazante não foram consideradas nestes cenários dado que, devido à posição inicial das partículas, estas seriam instantaneamente transportadas para a zona costeira exterior. Considerou-se um passo de cálculo de 300 segundos e simulações de 30 dias.

4.3 Análise dos Resultados

No cenário base (forçado pela maré, para a configuração batimétrica de base, sem vento e sem descargas de água doce), as partículas tendem a ser transportadas mais rapidamente para o exterior da Ria quando a sua origem é a barra do Ancão. Em situações de baixa-mar de marés mortas, o tempo de exportação de 50% das partículas para o exterior da Ria é de cerca de 4 dias quando a origem é a barra do Ancão, de 5 dias quando a origem é a barra de Faro-Olhão e de 6-7 dias quando a origem é a barra da Armona (Figura 4). Para a

exportação de 90% das partículas para a zona exterior estes tempos são de cerca de 10, 15 e 10-12 dias, respectivamente (Figura 4).

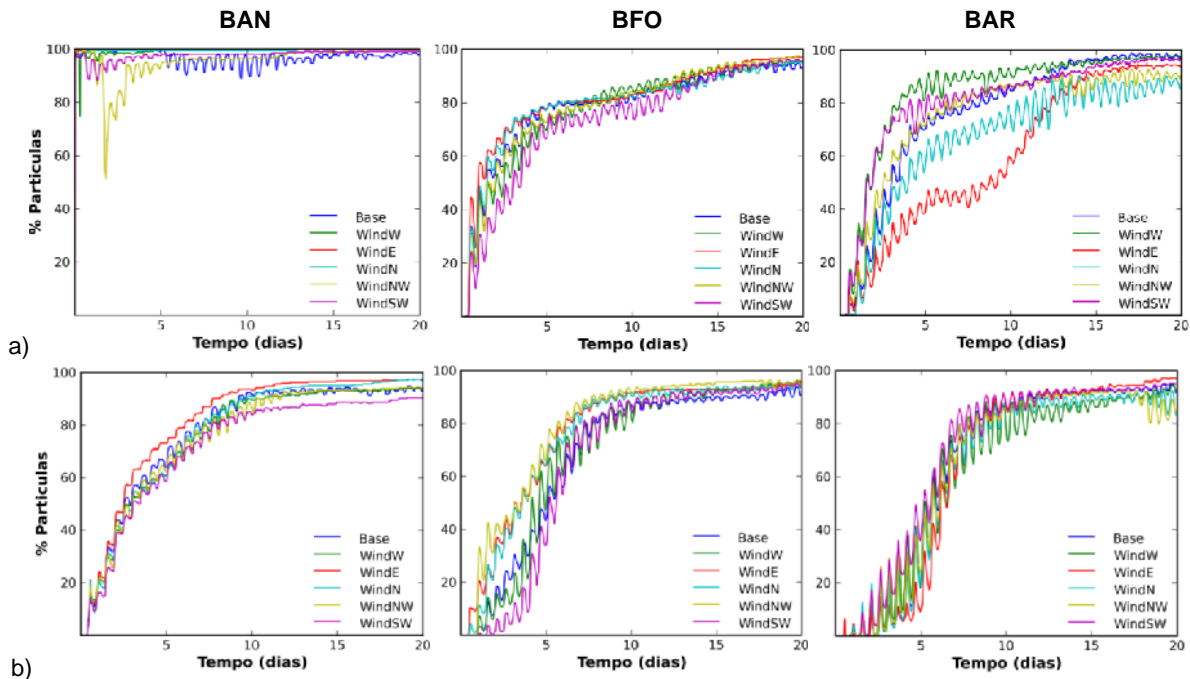


Figura 4. Influência do vento na exportação das partículas da Ria Formosa para a zona costeira exterior, considerando o início das simulações numa situação de baixa-mar de a) marés vivas e b) marés mortas. A posição inicial das partículas é indicada nas figuras: BAN – barra do Ancão, BFO – barra de Faro-Olhão e BAR – barra da Armona.

A exportação das partículas para o exterior da Ria Formosa ocorre predominantemente através da barra mais próxima da sua posição inicial. No caso particular da barra do Ancão, as partículas são totalmente exportadas por esta barra. Para as partículas cuja posição inicial é a barra de Faro-Olhão verifica-se que, embora a maior percentagem de partículas sejam transportadas através desta barra, algumas partículas são transportadas para Este pelo canal de Olhão, sendo exportadas pela barra da Armona, enquanto outras seguem para Oeste pelo canal de Faro e são exportadas pela barra da Ancão, correspondendo esta última situação à menor percentagem de partículas (Figura 5). Na barra da Armona, observa-se durante o período da enchente o transporte das partículas para Este, levando a que as partículas com origem nesta barra sejam exportadas também pela barra da Fuzeta. Nas várias barras observa-se uma maior tendência para a exportação (Figura 5).

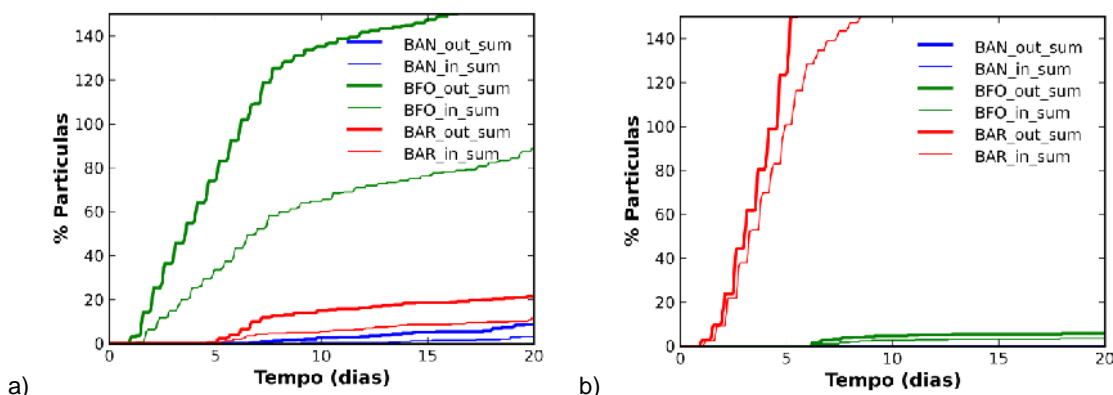


Figura 5. Histograma acumulado da percentagem de partículas que passam nas barras do Ancão (BAN), de Faro-Olhão (BFO) e da Armona (BAR) para o cenário base, considerando o início das simulações numa situação de baixa-mar de marés mortas e a posição inicial das partículas na a) barra de Faro-Olhão e b) barra da Armona.

O tipo de maré (marés vivas / marés mortas) afecta também o tempo de exportação para a zona costeira exterior e a distribuição das partículas pelas várias barras. Em situação de baixa-mar de marés vivas, os tempos de exportação da Ria tendem a ser consideravelmente inferiores (Figura 4, Figura 6), devido às maiores velocidades observadas. O tempo de exportação das partículas para o exterior é também reduzido quando a sua origem ocorre a meio da enchente, quer em marés mortas, quer em marés vivas (Figura 6).

No que se refere ao efeito do vento, observam-se tendências distintas em função da direcção do vento. Quando a posição inicial das partículas é a barra do Ancão, existe uma tendência para uma redução do tempo de exportação das partículas para a zona costeira exterior para o vento de Este e um aumento deste tempo para o vento de Sudoeste, em marés mortas (Figura 4). Para as partículas cuja origem é a barra da Armona, os tempos de exportação tendem a ser similares nos cenários com e sem vento em marés mortas, mas significativamente distintos em marés vivas, sugerindo um efeito combinado do vento e da maré (Figura 4). Para o vento de Este em baixa-mar de marés vivas, ocorre um aumento significativo do tempo de exportação de 50% das partículas (Figura 4), dado que este vento promove um aumento da exportação de partículas pela barra de Faro-Olhão. Por sua vez, o vento de Oeste reduz o tempo de exportação das partículas, promovendo o seu transporte pela barra da Fuzeta. Para as partículas cuja posição inicial é a barra de Faro-Olhão, os ventos de Sudoeste e de Oeste tendem a manter ou aumentar o tempo de exportação de 50% das partículas para o exterior, dado que promovem uma distribuição mais alargada ao logo do canal de Olhão (Figura 4). Nestas situações, observa-se um aumento significativo das partículas que são exportadas pela barra da Armona, comparativamente aos cenários só de maré, quer em marés mortas, quer em marés vivas. Contrariamente, os ventos de Este diminuem a exportação pela barra da Armona. A influência do vento é também significativa na distribuição das partículas no domínio, observando-se uma maior dispersão espacial nos cenários com vento (Figura 7).

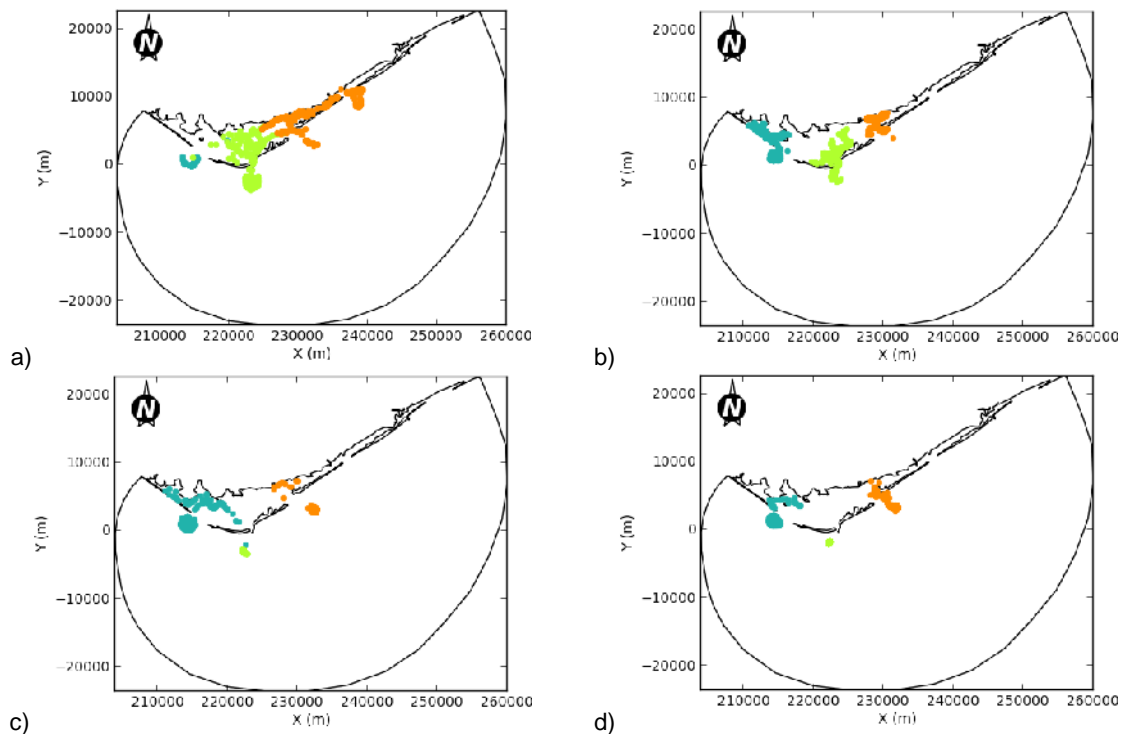


Figura 6. Distribuição espacial das partículas ao fim de 2 dias de simulação – cenário base, considerando o início da simulação numa situação de: a) baixa-mar de marés vivas, b) baixa-mar de marés mortas, c) meio da enchente de marés vivas e d) meio da enchente de marés mortas. As cores referem-se à posição inicial das partículas: azul – barra do Ancão, verde – barra de Faro-Olhão, laranja – barra da Armona.

Relativamente às diferentes configurações batimétricas analisadas, observa-se uma influência significativa da batimetria na exportação das partículas da Ria Formosa para a zona costeira exterior, em particular no tempo de exportação de 50% das partículas. As principais diferenças são observadas nas partículas com origem na barra da Armona em baixa-mar de maré morta, para as quais se verifica uma diminuição do tempo de exportação de 50% das partículas para 3-4 dias (comparativamente aos 6-7 dias do cenário de base) na configuração similar à batimetria dos anos 80 (Figura 8). Estes resultados evidenciam a diminuição da capacidade de escoamento da barra da Armona sugerida por vários autores (e.g. Jacob *et al.*, 2013), a qual é particularmente relevante em maré morta. Uma outra situação ocorre no tempo de exportação de 90% das partículas na maré viva nas barras da Armona e de Faro-Olhão, o qual é também inferior nos cenários com a batimetria de 1980 (Figura 8). O fecho da barra do Ancão não tem influência significativa no tempo de exportação de partículas nas barras da Armona, mas reduz ligeiramente o tempo de exportação das partículas com origem na barra de Faro-Olhão (Figura 8). Tal como o vento, a batimetria também influencia a distribuição espacial das partículas (Figura 7) e barra através da qual ocorre a exportação para a zona costeira exterior. As partículas tendem a ser maioritariamente exportadas pela barra mais próxima da sua origem, como observado no cenário base. No entanto, os resultados sugerem uma tendência para a importação pela barra do Ancão das partículas com origem da barra de Faro-Olhão na configuração batimétrica dos anos 80, contrária à da configuração batimétrica do cenário base onde a barra do Ancão maioritariamente exporta partículas com origem na barra de Faro-Olhão. Estas diferenças, combinadas com a variabilidade da própria barra do Ancão, que nas últimas décadas já sofreu diversos processos de migração (Pacheco *et al.*, 2010), sugerem uma elevada variabilidade na dinâmica entre a barra de Faro-Olhão e a barra do Ancão.

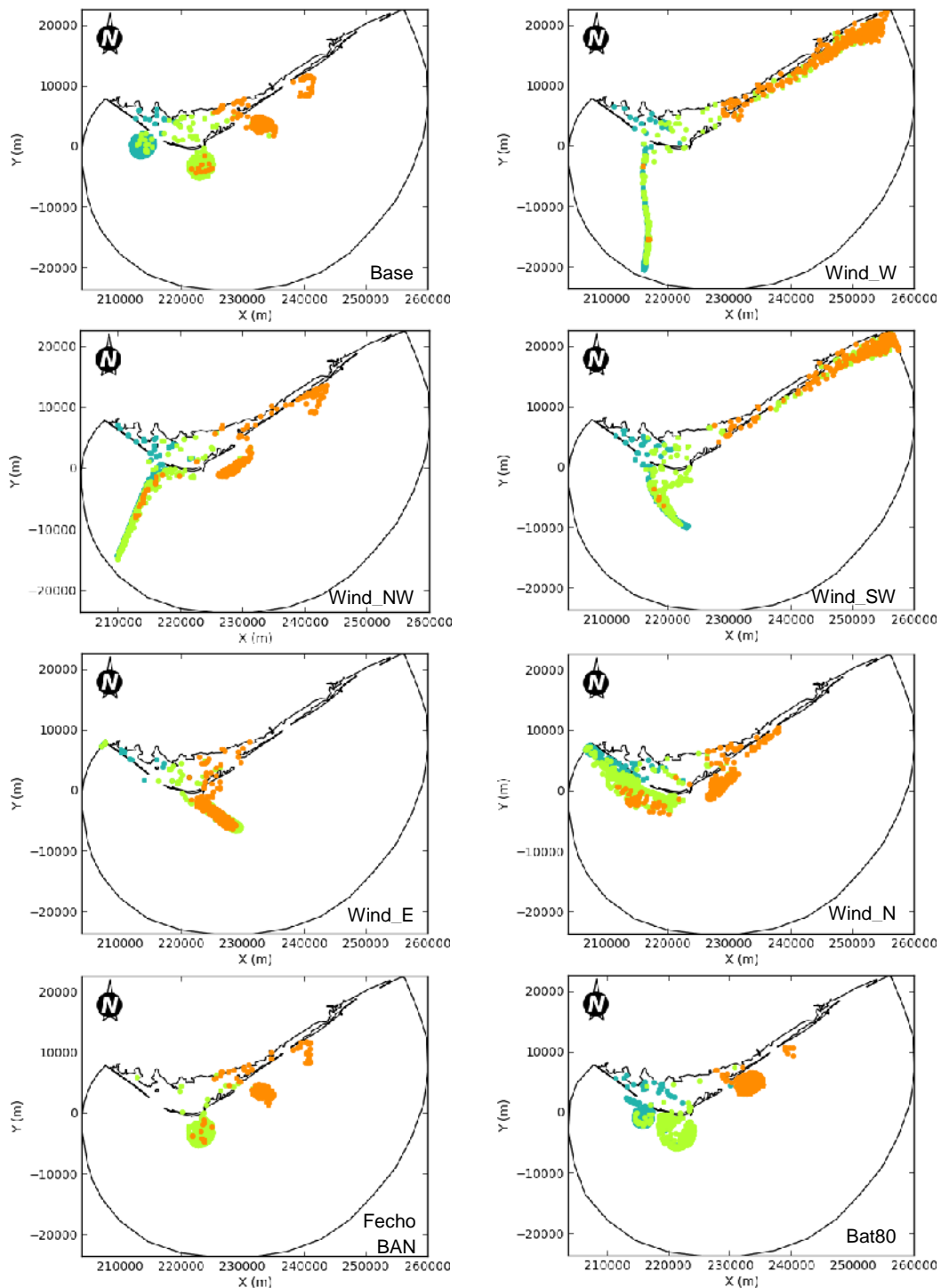


Figura 7. Distribuição espacial das partículas ao fim de 15 dias de simulação, considerando o início da simulação numa situação de baixa-mar de marés mortas. As cores referem-se à posição de origem das partículas no início da simulação: azul – barra do Ancão, verde – barra de Faro-Olhão, laranja – barra da Armona.

Como esperado, não se observa uma influência significativa das descargas de água das ETAR na circulação e transporte de partículas localizadas nas barras, mesmo em situações de caudal mais elevado, dado que os caudais de água doce são reduzidos face ao prisma

de maré do sistema. No entanto, as descargas das ETAR são potenciais fontes de de nutrientes e de poluentes para o sistema, os quais podem influenciar a dinâmica do ecossistema. Neste sentido, importa analisar a distribuição e transporte no sistema de partículas com origem nestas fontes, estando esta análise em curso no âmbito do projecto.

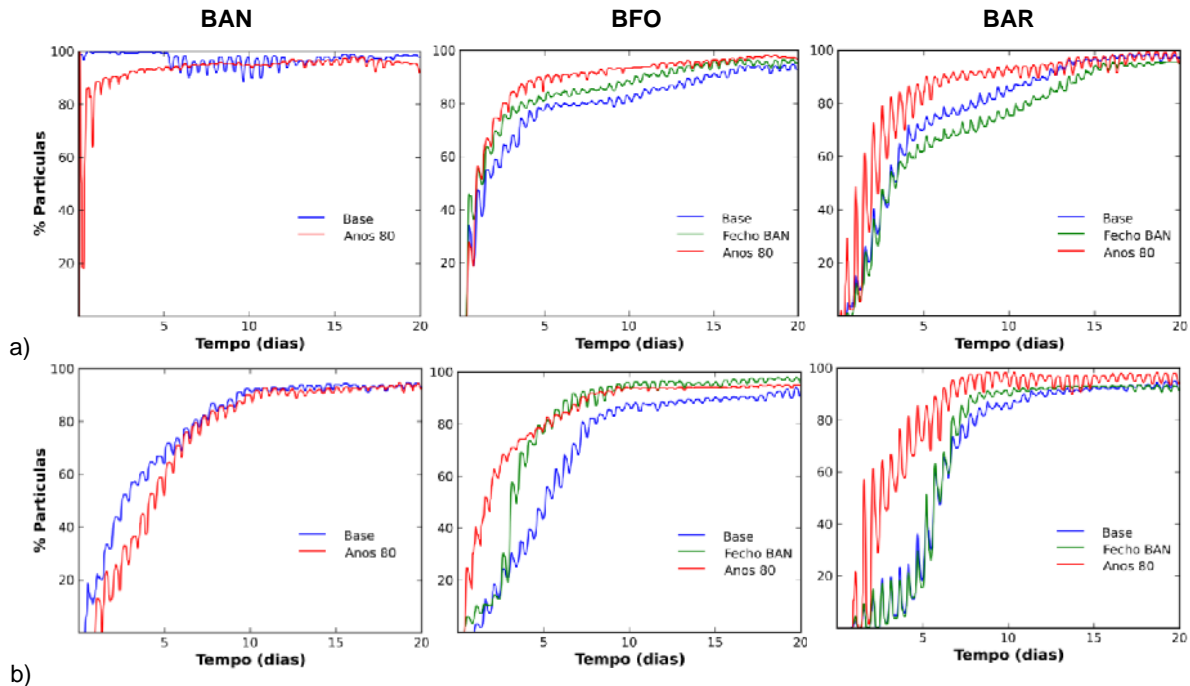


Figura 8. Influência da batimetria na exportação das partículas da Ria Formosa para a zona costeira exterior, considerando o início da simulação numa situação de baixa-mar de a) marés vivas e b) marés mortas. A posição inicial das partículas é indicada nas figuras: BAN – barra do Ancão, BFO – barra de Faro-Olhão e BAR – barra da Armona.

5. CONCLUSÕES

A influência dos forçamentos (vento, batimetria e caudais de água doce) na circulação e no transporte na Ria Formosa foi analisada com recurso a modelação numérica. O modelo hidrodinâmico SELFE foi calibrado e validado na zona de estudo com base em dados de níveis e velocidades, incluindo os dados das campanhas do projecto COALA. Os resultados mostram a boa capacidade do modelo de representar a circulação na Ria Formosa. A circulação e o transporte foram analisados com o modelo lagrangeano VELApert. Os resultados sugerem uma influência da direcção do vento e da batimetria na quantidade de partículas exportadas para o exterior a escalas temporais mais curtas, assim como nas barras pelas quais as partículas são exportadas e na sua distribuição espacial.

Os resultados obtidos no presente estudo, complementados com os dados obtidos nas campanhas do projecto COALA, serão utilizados em trabalhos futuros para melhorar a compreensão da dinâmica nutrientes, clorofila a e matéria particulada na Ria Formosa. O presente estudo será também alargado tendo em vista a análise da influência de potenciais

fontes de poluentes, permitido estimar padrões e melhorar a definição de planos de monitorização, e contribuindo, em última análise, para melhorar a gestão da Ria Formosa.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi co-financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projecto “COALA – Dinâmica dos nutrientes e da matéria particulada – trocas entre uma lagoa costeira e o oceano adjacente através de um sistema de múltiplas barras: o caso da Ria Formosa, sul de Portugal” (PTDC/MAR/114217/2009). A segunda autora é co-financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da bolsa SFRH/BPD/87512/2012. Os autores agradecem ao Prof. António Melo Baptista, do CMOP (EUA), e ao Prof. Joseph Zhang, do VIMS (EUA), pela disponibilização do modelo SELFE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo A., Oliveira A., Fortunato A.B., Bertin X. (2009). Application of an Eulerian-Lagrangian oil spill modeling system to the Prestige accident: trajectory analysis. *Journal of Coastal Research*, SI56: 777-781.
- Azevedo, A., Oliveira A., Fortunato A.B., Zhang J., Baptista A.M. (2014). A cross-scale numerical modeling system for management support of oil spill accidents. *Marine Pollution Bulletin*, em impressão.
- Bertin X., Bruneau N., Breilh J.-F., Fortunato A., Karpytchev M. (2012) Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia. *Ocean Modelling*, 42, pp.16-30.
- Dias J.M., Sousa M., Bertin X., Fortunato A., Oliveira A. (2009). Numerical modeling of the impact of the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal). *Environmental Modelling & Software*, 24, pp. 711-725.
- Dodet G., Bertin X., Bruneau N., Fortunato A.B., Nahon A., Roland A. (2013). Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3), pp. 1587–1605.
- Jacob J., Cardeira S., Rodrigues M., Bruneau N., Azevedo A., Fortunato A.B., Cravo A., Rosa M. (2012). Contribuição para o estudo da propagação da maré no sector Oeste da Ria Formosa. *Actas das 2.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 2012, pp. 185-188.
- Jacob J., Cardeira S., Rodrigues M., Bruneau N., Azevedo A., Fortunato A.B., Rosa M., Cravo A. (2013). Experimental and numerical study of the hydrodynamics of the western sector of Ria Formosa. *Journal of Coastal Research*, SI 65, pp. 2011-2016.
- Newton A., Mudge S.M. (2003). Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, pp. 73-85.
- Oliveira A., Fortunato A.B. (2002). VELApart User's Manual (Version 3.1): A quasi-3D Particle-Tracking Model for Shallow Water Simulations. Report 82/02 – NET/LNEC.

- Pacheco A., Ferreira O., Williams J., Garel E., Vila-Concejo A., Dias J. (2010). Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274, pp. 32-42.
- Portela L., Azevedo A., Fortunato A.B. (2011). Valorização hidrodinâmica da Ria Formosa e mitigação do risco nas ilhas barreira, Rel. 3: Valorização hidrodinâmica da laguna. Rel. 395/2011 – NEC/LNEC.
- Pinto L., Fortunato A.B., Zhang Y., Oliveira A., Sancho F.E.P. (2012). Development and validation of a three-dimensional morphodynamic modelling system for non-cohesive sediment. *Ocean Modelling*, 57–58, 1–14.
- Rodrigues, M., Oliveira A., Queiroga H, Brotas V. (2012). Seasonal and diurnal water quality modelling along a salinity gradient (Mira channel, Aveiro lagoon, Portugal). *Procedia Environmental Sciences*, 899-918.
- Rodrigues, M., Oliveira A., Queiroga H., Fortunato A.B. e Zhang Y.J. (2009). Three-dimensional modeling of the lower trophic levels in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ecological Modelling*, 220, 1274-1290.
- Rodrigues, M., Oliveira A., Guerreiro M., Fortunato A.B., Menaia J., David L.M., Cravo A. (2011). Modeling fecal contamination in the Aljezur coastal stream (Portugal). *Ocean Dynamics*, 61, 841-856.
- Roland, A., Zhang Y.J., Wang H.V., Meng Y., Teng Y.C., Maderich V., Brovchenko I., Dutour-Sikiric M., Zanke U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 117(C11).
- Salles P. (2001). *Hydrodynamic controls on multiple tidal inlet persistence*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution.
- Salles P., Voulgaris G., Aubrey D. (2005). Contribution of nonlinear mechanisms in the persistence of multiple tidal inlet systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, 65, pp. 475-491.
- Silva M., Patrício P., Mariano A.C., Valério M., Morais M. (2012). Obtenção de Dados LIDAR para as Zonas Costeiras de Portugal Continental. *Actas das 2.ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 2012, pp. 19-22.
- Vila-Concejo A., Matias A., Ferreira Ó., Duarte C., Dias J.M.A. (2002). Recent evolution of the natural inlets of a barrier island system in Southern Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI 36, pp. 741-752.
- Zhang Y.-L., Baptista A.M., Meyers E.P. (2004). A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research*, 24 (18), 2187-211.
- Zhang Y.-L., Baptista A.M. (2008). SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21/3-4: 71-96.
- Zheng L., Weisberg R.H., Huang Y., Luetlich R.A., Westerink J.J., Kerr P.C., Donahue A.S., Crane G., Akli L. (2013). Implications from the comparisons between two- and three-dimensional model simulations of the Hurricane Ike storm surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 118, pp. 3350–3369.