

# EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA, HIDRODINÂMICA E DINÂMICA SEDIMENTAR DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO

## Morphological evolution, hydrodynamics and sediment dynamics of the Minho River estuary

LUÍS IVENS PORTELA

*Investigador Auxiliar, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC),  
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, lportela@lnec.pt*

### Resumo

Descreve-se um estudo sobre a evolução morfológica, a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar do estuário do rio Minho, no qual se analisaram os problemas de assoreamento e de erosão do sistema. Numa primeira fase do estudo, efectuou-se: (a) a recolha de informação de base relativa às características do estuário e às diversas intervenções humanas na bacia hidrográfica e no estuário (construção de barragens, extracção de inertes, dragagens); (b) a comparação de cartografia e de levantamentos topo-hidrográficos, datados de 1886 a 2006, e a análise de outros elementos (fotografia aérea, dados de maré), para apreciação da evolução morfológica do estuário; e (c) a identificação das causas mais prováveis, naturais ou humanas, dessa evolução. Numa segunda fase do estudo, efectuou-se a aplicação de modelos matemáticos para: (a) a simulação da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar; e (b) a simulação dos efeitos das intervenções realizadas. Verifica-se que o elevado preenchimento sedimentar do estuário não é um fenómeno recente. Porém, o sistema está sujeito a um processo contínuo de evolução morfológica, que deve ser tido em consideração na gestão do estuário.

**Palavras-chave:** Assoreamento, erosão, estuário, Minho, modelação.

### Abstract

A study on the morphological evolution, hydrodynamics and sediment dynamics of the Minho River estuary, in which the problems of sedimentation and erosion have been investigated, is described. In the first phase of the study, the following tasks were carried out: (a) collection of basic information regarding the characteristics of the estuary and the various human interventions in the watershed and estuary (dam construction, aggregate extraction, dredging), (b) comparison of maps and hydrographic surveys, dating from 1886 to 2006, and analysis of other elements (aerial photography, tidal data) to examine the morphological evolution of the estuary, and (c) identification of the most likely causes (natural or human) of that evolution. In the second phase, numerical models were applied to: (a) simulate hydrodynamics and sediment dynamics, and (b) simulate the effects of human interventions. It appears that the high degree of sediment infilling of the estuary is not a recent phenomenon. However, the system is subject to a continuous process of morphological evolution, which should be taken into consideration in the management of the estuary.

**Keywords:** Sedimentation, erosion, estuary, Minho, modelling.

### 1. Introdução

A evolução morfológica do estuário do rio Minho é uma matéria que tem suscitado um interesse considerável por parte das autoridades portuguesas e espanholas que cooperam na gestão das águas fronteiriças.

Com efeito, receia-se que os aproveitamentos hidráulicos construídos na bacia hidrográfica, por efeito da regularização de caudais e da redução de frequência e intensidade das cheias, estejam a contribuir para o assoreamento do trecho inferior do estuário (Oliveira, 2000; Vicente, 2000), que apresenta actualmente profundidades muito reduzidas. O agravamento das actuais condições de assoreamento poderia ter implicações significativas na navegação fluvial, nomeadamente na navegação entre as

duas margens, na pesca local e noutras actividades de interesse social e económico. Por outro lado, foram registados episódios de erosão em algumas praias situadas na proximidade da embocadura (CEDEX, 2004), com potenciais efeitos na actividade balnear.

Dado que o estuário abrange áreas classificadas no âmbito da Rede Natura 2000 (nomeadamente PTCON0019 – Rio Minho e PTZPE0001 – Estuário dos Rios Minho e Coura), é também importante a salvaguarda dos valores ambientais em presença. Assim, seria desejável que eventuais intervenções correctivas se baseassem num conhecimento aprofundado do sistema.

Verifica-se, porém, que os estudos realizados sobre o estuário do rio Minho têm sido em número relativamente escasso. Com interesse para a dinâmica sedimentar, da

parte portuguesa, destacam-se Consulmar (1990), Alves (1996) e, mais recentemente, o projecto ECOIS (Balsinha *et al.*, 2009). Da parte espanhola, destacam-se Universidad de Cantabria (1996) e CEDEX (2004).

Neste enquadramento, foi realizado recentemente um estudo sobre os problemas de assoreamento e de erosão no estuário do rio Minho. Esse estudo compreendeu uma análise da evolução morfológica do sistema nos últimos 100 anos (Portela, 2007a) e a modelação da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar (Portela, 2007b), tarefas que, podendo preencher lacunas no conhecimento, se consideraram particularmente relevantes para a avaliação dos problemas referidos. No presente artigo, descrevem-se, de forma sucinta, alguns resultados desse estudo.

## 2. Descrição da área de estudo

O estuário do rio Minho tem um comprimento de cerca de 34 km, constituindo fronteira entre Portugal e Espanha. Pode dividir-se em três sectores: inferior (km 0-3), entre o limite jusante e Caminha; médio (km 3-14), entre Caminha e Vila Nova de Cerveira; e superior (km 14-34), entre Vila Nova de Cerveira e o limite montante, cerca de 5 km a montante de Valença.

O estuário apresenta diversas ilhas de natureza sedimentar (ilha da Boega, próxima de Vila Nova de Cerveira, e, mais a jusante, ilhas Morraceira das Varandas, Morraceira do Grilo e Canossa, próximas da margem espanhola). De forma geral, a largura do estuário aumenta de montante para jusante, registando-se uma largura máxima de 2000 m a montante de Caminha. A profundidade máxima, cerca de 24 m (ZH), é atingida próximo de Vila Nova de Cerveira. Nos sectores médio e inferior do estuário, a área situada acima do ZH representa cerca de 70% da área total, o que indica um avançado grau de preenchimento sedimentar. O elemento mais notável da embocadura é a Ínsua, ilha rochosa situada entre a barra norte ou espanhola, muito perigosa, e a barra sul ou portuguesa, um pouco menos perigosa mas muito variável.

Desde meados do século passado, têm sido efectuadas diversas intervenções na bacia hidrográfica e no estuário, com possíveis implicações na evolução morfológica do estuário e da zona costeira. Entre 1950 e 1978, foram construídos 34 aproveitamentos hidroeléctricos na parte espanhola da bacia hidrográfica. Admite-se que estes aproveitamentos possam ter causado uma diminuição da frequência das cheias, contribuindo para o assoreamento do estuário (Vicente, 2000).

Estima-se que a extracção de inertes nos sectores superior e médio do estuário, entre 1973 e 1989, tenha retirado ao sistema um volume de material sedimentar da ordem de

$8 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Estima-se ainda que a abertura do canal do ferry-boat em Caminha, em 1994, e a sua posterior manutenção tenham retirado ao sector inferior do estuário um volume da ordem de  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

## 3. Metodologia

Numa primeira fase, efectuou-se a recolha de informação de base e a comparação de oito cartas e levantamentos hidrográficos, datados de 1886 a 2006, para apreciação da evolução morfológica do estuário, relacionando-a com as características do sistema e com as diversas intervenções humanas na bacia hidrográfica e no estuário. A comparação de cartas e levantamentos hidrográficos foi complementada pela análise de outros elementos, nomeadamente dados de maré em Caminha e Valença do último quartel do séc. XIX e fotografias aéreas da embocadura cobrindo o período de 1958 à actualidade.

Numa segunda fase, efectuou-se a aplicação de modelos matemáticos, designadamente: um modelo hidrodinâmico para a simulação do escoamento de maré, baseado nas equações de águas pouco profundas (*shallow water equations*); um modelo de transporte lagrangiano para a simulação das trajectórias de traçadores; um modelo de transporte euleriano para a simulação da distribuição da salinidade, baseado na equação de advecção-difusão; e um modelo de transporte de sedimentos não-coesivos, baseado na formulação de Ackers-White (Portela, 1996).

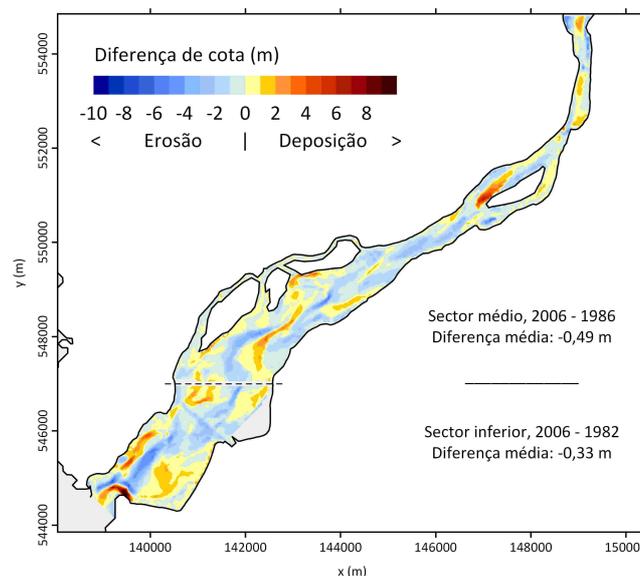


Figura 1. Comparação de levantamentos hidrográficos do sector inferior (1982 e 2006) e do sector médio (1986 e 2006) do estuário do rio Minho, com indicação da variação média de cota.

Quadro 1. Comparação de levantamentos dos sectores inferior e médio do estuário do rio Minho: área comum ( $\text{km}^2$ ), volume de erosão ( $\text{m}^3$ ), volume de deposição ( $\text{m}^3$ ) e variação total do volume sedimentar ( $\text{m}^3$ ).

	PERÍODO	ÁREA ( $\text{km}^2$ )	EROSÃO ( $\text{m}^3$ )	DEPOSIÇÃO ( $\text{m}^3$ )	TOTAL ( $\text{m}^3$ )
SECTOR INFERIOR	2006 - 1982	4,9	-4 008 000	+2 390 000	-1 618 000
SECTOR MÉDIO	2006 - 1986	8,2	-6 419 000	+2 414 000	-4 005 000

Para a construção das malhas de cálculo, foram utilizados um levantamento do Instituto Hidrográfico de 2006, levantamentos do Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos de 1982 e 1986 e uma carta náutica da zona costeira exterior. Adoptou-se uma resolução espacial de 100 m na malha geral 2D, ligando-se esta a uma malha 1D no sector superior do estuário, até ao seu limite montante. Como condição de fronteira oceânica, consideraram-se 5 constituintes de maré ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ). Como condição de fronteira fluvial, consideraram-se os caudais médios diários em Foz do Mouro.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Análise da evolução morfológica

A comparação de levantamentos hidrográficos, datados de 1886 a 2006, revela que a morfologia do estuário está continuamente em evolução. Esta evolução traduz-se pelo deslocamento de bancos e canais de maré, obtendo-se, entre levantamentos em diferentes datas, volumes significativos de assoreamento e de erosão (da ordem de  $10^6$  a  $10^7$  m<sup>3</sup> em cerca de 20 anos; Quadro 1).

Porém, não foi possível identificar um padrão consistente de evolução média. Com efeito, nos levantamentos do sector inferior do estuário de 1969, 1977 e 1982, verifica-se uma tendência de assoreamento moderado, da ordem de +0,01 m ano<sup>-1</sup>. O levantamento de 2006, pelo contrário, sugere uma tendência de erosão, quer no sector inferior do estuário (-0,33 m entre 1982 e 2006), quer no sector médio (-0,49 m entre 1986 e 2006; Figura 1). Esta tendência mais recente poderia estar relacionada com as intervenções de extracção de inertes e de dragagem no sistema. No entanto, não se pode excluir a possibilidade de as diferenças obtidas se deverem, pelo menos parcialmente, a diferenças de nivelamento dos levantamentos.

Dado que a análise efectuada não permite concluir por um agravamento substancial das condições de assoreamento nas últimas décadas, afigura-se provável que as alterações morfológicas em certos trechos do estuário e em algumas praias se devam, em larga medida, à redistribuição do material sedimentar do sistema. Por exemplo, no sector inferior do estuário, verifica-se uma alteração significativa da morfologia entre 1977, data em que se observam dois canais de maré, norte e sul, e uma área assoreada ("seco" ou "areinho") aproximadamente central, e 2006, data em que se observa um canal de maré relativamente central, encontrando-se a área assoreada adjacente à margem portuguesa (observando-se também o canal do ferry-boat entretanto aberto entre Caminha e Pasaxe; Figura 2). Estas alterações morfológicas originam variações locais de cota de vários metros.

Confirmando a análise dos levantamentos mais antigos de 1886 e 1913, a comparação de elementos de maré de finais do séc. XIX (Quadro 2) e de finais do séc. XX (Quadro 3) indica que a elevação do nível de baixa-mar de águas vivas em Caminha relativamente à zona costeira (cerca de 0,7 m), fenómeno característico de ambientes de reduzidas profundidades, é anterior à construção de aproveitamentos hidráulicos na bacia hidrográfica.

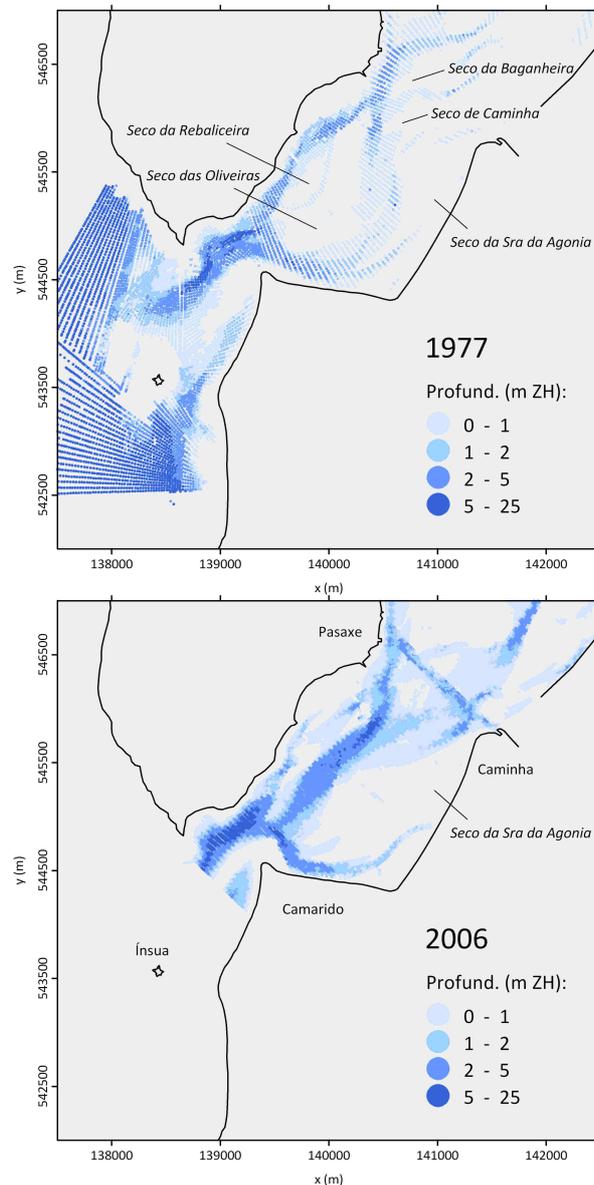


Figura 2. Evolução em planta dos canais de maré do sector inferior do estuário. a) 1977; b) 2006.

Quadro 2. Diminuição das amplitudes de maré (m) de águas vivas (PM - BM AV) e de águas mortas (PM - BM AM) no sector inferior do estuário, entre a zona costeira exterior e Caminha, em finais do séc. XIX (Loureiro, 1904).

	PM - BM AV (m)	PM - BM AM (m)
<b>A: CABEDELLO</b>	3,03	1,32
<b>B: PONTE DE CAMINHA</b>	2,32	0,97
<b>DIFERENÇA: A - B</b>	0,71	0,35

Quadro 3. Diminuição das amplitudes de maré (m), em finais do séc. XX (Instituto Hidrográfico, 1999).

	PM - BM AV (m)	PM - BM AM (m)
<b>A: VIANA DO CASTELO</b>	2,97	1,37
<b>B: CAMINHA</b>	2,26	1,15
<b>DIFERENÇA: A - B</b>	0,71	0,22

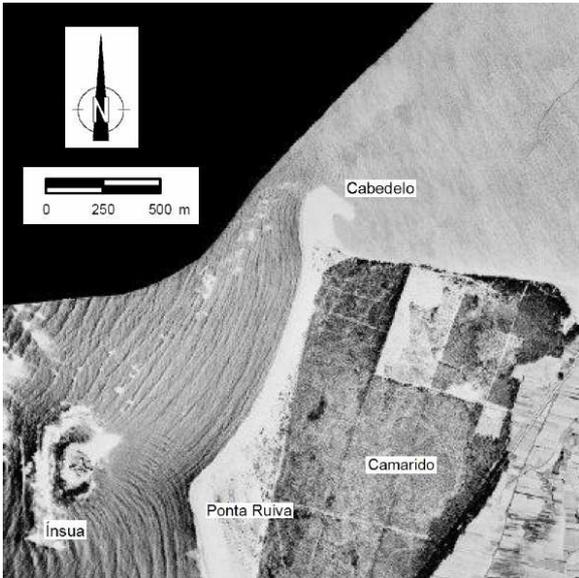


Figura 3. Fotografia aérea da margem portuguesa da embocadura em 1958 (© Instituto Geográfico do Exército).

Conclui-se, dos levantamentos hidrográficos e dos elementos de maré analisados, que o actual preenchimento sedimentar reflecte um processo de assoreamento mais prolongado no tempo, determinado fundamentalmente pela relativa estabilidade do nível médio do mar e pela deposição de material sedimentar nos últimos milhares de anos (período holocénico).

A fotografia aérea permite apreciar a variabilidade das áreas emersas da embocadura e do trecho de costa arenosa situado a sul, incluindo o saliente da Ponta Ruiva formado por acção da onda sobre a Insua (Figura 3). Entre 1958 e a actualidade, não se observa um recuo muito significativo da linha de costa neste trecho. Verifica-se, no entanto, que o limite da zona arborizada do Camarido se deslocou no sentido da praia, tendo este deslocamento atingido na Ponta Ruiva um valor de 250 m. A expansão da zona arborizada originou um aparente emagrecimento da faixa de praia e duna.

#### 4.2. Modelação da dinâmica estuarina

A verificação do modelo hidrodinâmico consistiu na comparação de valores calculados de níveis de maré com medições realizadas em 1990 em três estações: Camarido, Seixas e Vila Nova de Cerveira (Consulmar, 1990; Alves, 1996). Efectuaram-se simulações com duas malhas de cálculo, uma de 1982-86, outra de 2006. Verificou-se que ambas as batimetrias reproduzem de forma adequada o efeito do assoreamento sobre a propagação das marés de maior amplitude, nomeadamente a ocorrência de níveis de baixa-mar mais elevados no interior do estuário do que na zona exterior (Portela, 2007b).

Apresentam-se, na Figura 4, os campos de velocidades obtidos com a malha de cálculo referente à situação em 2006. Para uma maré de amplitude média e um caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , calcularam-se velocidades máximas na embocadura de  $1,2 \text{ m s}^{-1}$  em vazante. Embora menos fortes do que na embocadura, as correntes no interior do estuário são também significativas, tendo sido obtidas velocidades máximas de  $0,9 \text{ m s}^{-1}$  no sector médio do estuário no final da vazante, ou seja, três horas mais tarde.

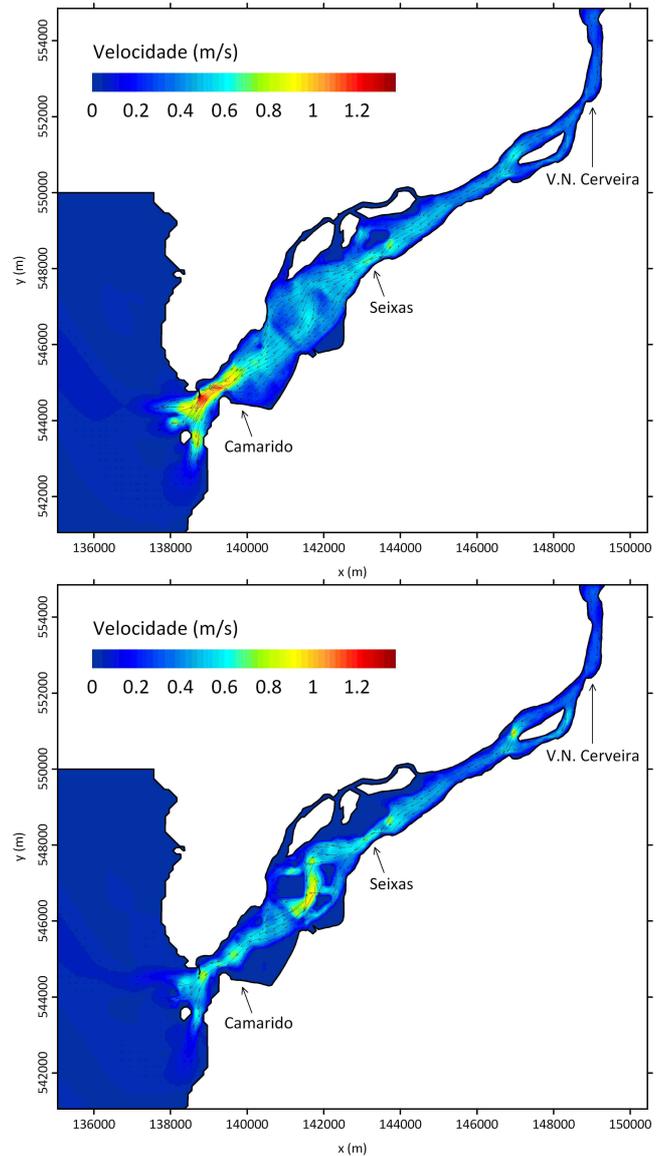


Figura 4. Simulação do campo de velocidades ( $\text{m s}^{-1}$ ) no estuário do Minho em situação de maré média para um caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . a Vazante; b Final da vazante (3 horas depois).

Calcularam-se caudais de maré na secção da embocadura (Camarido) em maré viva (amplitude de 3,0 m) e em maré morta (amplitude de 1,4 m), para caudais fluviais de 100 e de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Para um caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , em maré viva, o caudal de maré máximo atinge  $2800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  em enchente e  $2400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  em vazante. Em maré morta, foram calculados caudais de maré máximos de  $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  em enchente e em vazante.

Com base nos caudais de maré, foram calculados prismas de maré. Na secção de Camarido, para um caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , foram obtidos prismas de maré de cerca de  $34 \times 10^6 \text{ m}^3$  em maré viva e de  $19 \times 10^6 \text{ m}^3$  em maré morta. Verifica-se uma boa concordância destes valores com anteriores estimativas (Consulmar, 1990).

Para um caudal fluvial de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , os prismas de maré na secção da embocadura sofrem uma redução de cerca de 20% em maré viva e de 40% em maré morta. Em secções situadas a montante, com menores prismas de maré, a redução é mais acentuada (p.ex., em V. N. Cerveira, de 55% em maré viva e de 75% em maré morta).

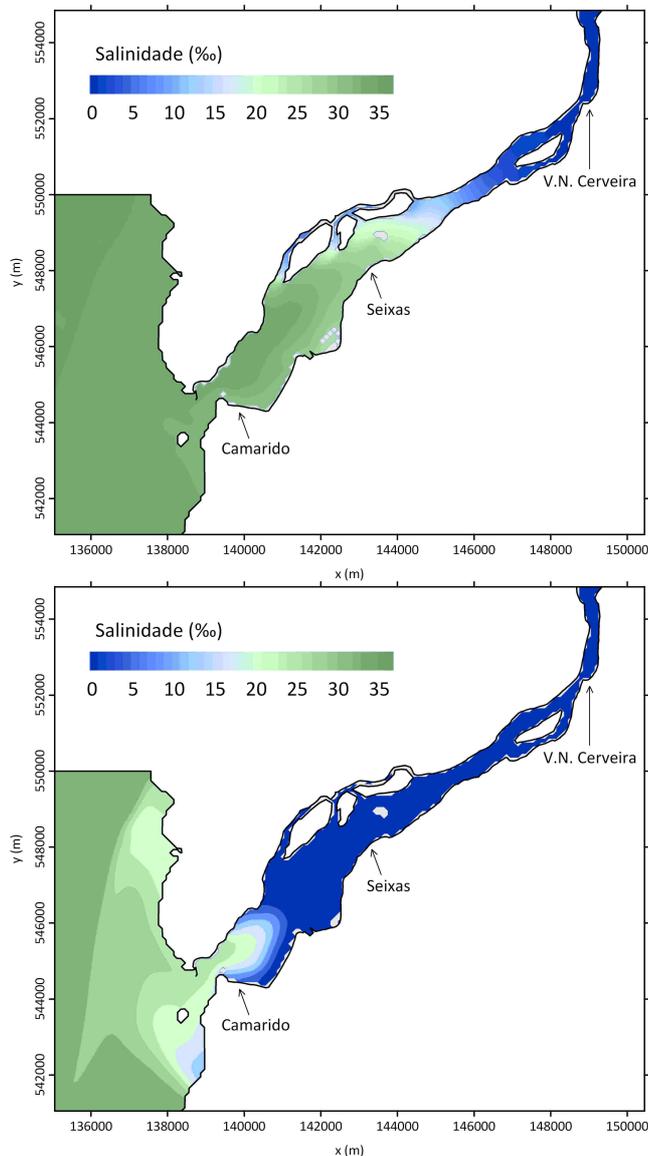


Figura 5. Simulação da distribuição da salinidade (‰) no estuário do Minho em situação de maré viva, final da enchente. **a** Caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; **b** Caudal fluvial de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

As simulações da distribuição da salinidade devem ser interpretadas de forma qualitativa, dado que não têm em conta o efeito de estratificação vertical. Os resultados indicam que, para um caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , em maré viva (amplitude de 3,0 m) e em máxima enchente, o sector inferior e parte do sector médio do estuário apresentam salinidades elevadas. Para um caudal de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , na mesma situação de maré, prevê-se que as salinidades elevadas se encontrem confinadas a parte do sector inferior do estuário (Figura 5). Em situação de máxima vazante, para um caudal de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , estima-se que as salinidades sejam pouco importantes no interior do estuário. Para um caudal de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , prevê-se que se formem plumas de água doce na zona costeira exterior.

A utilização de traçadores lagrangianos permite obter indicações sobre os processos de transporte e a magnitude dos tempos de residência. Nos resultados da Figura 6, os traçadores foram libertados numa secção coincidente com o canal do ferry entre Caminha e Pasaxe, em quatro pontos. As trajectórias foram calculadas ao longo de um ciclo de maré (período de 12 horas e 25 minutos), iniciado na parte

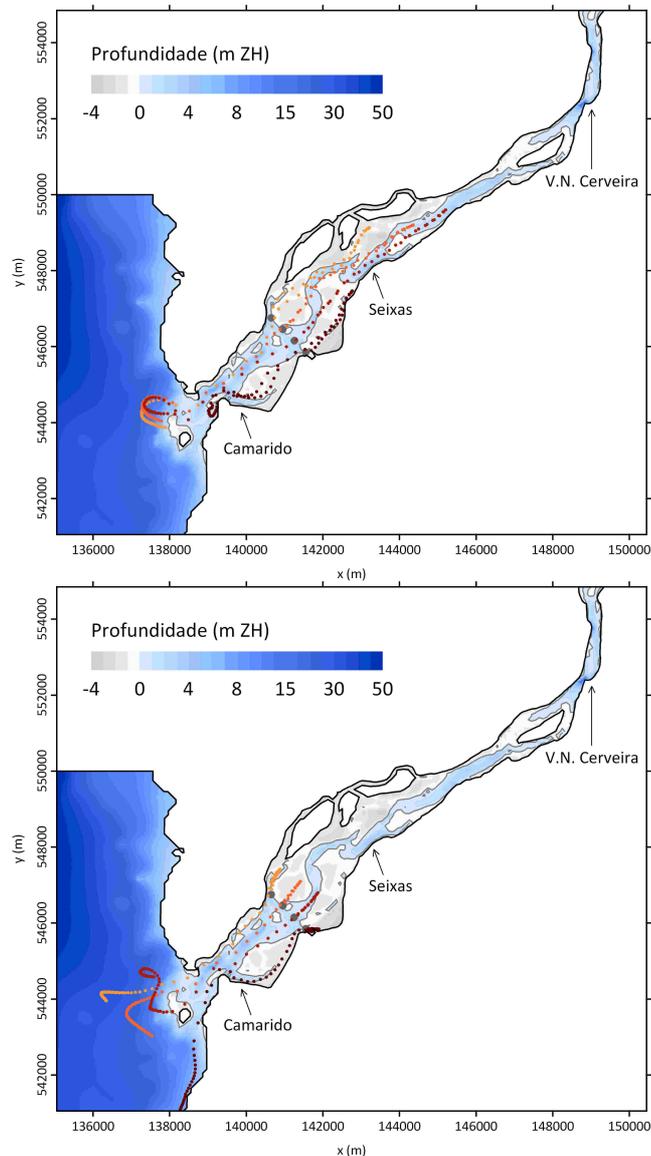


Figura 6. Simulação de trajectórias de traçadores com origem em quatro pontos do estuário do Minho, em situação de maré viva, durante um ciclo de maré. **a** Caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; **b** Caudal fluvial de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

final da enchente. Verifica-se que, em maré viva e para um caudal fluvial de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , os traçadores se deslocam inicialmente (no final da enchente) cerca de 5 km para montante, sendo depois (durante a vazante) expulsos do estuário pela barra norte, com excepção do traçador com origem mais próxima da margem portuguesa, que permanece na zona da embocadura. Para um caudal de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , os traçadores apresentam inicialmente um movimento mais restrito para montante, de cerca de 1 km, sendo posteriormente expulsos do estuário pelas barras norte e sul (Figura 6). As simulações realizadas indicam ser razoável considerar valores típicos da excursão de maré, para um caudal de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , da ordem de 12 km em maré viva e de 7 km em maré morta.

Os resultados do cálculo de capacidades de transporte de sedimentos, efectuado pelo método de Ackers-White considerando um diâmetro característico  $D_{35}$  de 0,35 mm, devem ser entendidos como uma simples análise de sensibilidade, dada a impossibilidade da sua verificação. Acresce o facto de não se conhecerem dados de caudal

Quadro 4. Simulação de fluxos de sedimentos não-coesivos ( $\text{kg s}^{-1}$ ,  $D_{35} = 0,35 \text{ mm}$ ) na secção de Vila Nova de Cerveira.

CAUDAL FLUVIAL ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	CAUDAL SÓLIDO ( $\text{kg s}^{-1}$ )	PONDERAÇÃO (-)
250	0,180	0,95
1040	13,461	0,04
2270	126,217	0,01

fluvial anteriores à construção dos aproveitamentos hidráulicos na bacia hidrográfica. Considerando a série de caudais disponível (1973/74 a 1996/97), ordenada e dividida em três fracções (0-95, 95-99 e 99-100%), os cálculos realizados sugerem que os fluxos sedimentares resultem essencialmente de breves episódios de caudais elevados (Quadro 4). Sugerem também que alterações introduzidas no regime de caudais, nomeadamente a sua regularização pelos aproveitamentos hidráulicos, com diminuição da frequência dos caudais mais elevados, podem ter tido implicações significativas na dinâmica sedimentar.

## 5. Conclusões

Com base na análise da evolução morfológica, verifica-se que o avançado grau de preenchimento sedimentar do estuário do rio Minho não é um fenómeno recente. Verifica-se também que o estuário está sujeito a um processo contínuo de evolução morfológica, que se traduz pelo deslocamento de bancos e canais de maré e que pode sofrer alguma influência das intervenções realizadas no estuário. Embora se considere que a construção de aproveitamentos hidroeléctricos na bacia hidrográfica não terá sido determinante para as condições de assoreamento actualmente observadas, os resultados de modelação matemática indicam que as alterações associadas à diminuição da frequência dos caudais de cheia podem ter tido implicações significativas na dinâmica sedimentar. Considera-se, por isso, importante continuar a seguir a evolução morfológica e sedimentar do sistema.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do "Estudo dos problemas de assoreamento e erosão no estuário do rio Minho", financiado pelo Instituto da Água, I.P.

## Referências

- Alves, A.M.C. (1996). *Causas e processos da dinâmica sedimentar na evolução actual do litoral do Alto Minho*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 442 p.
- Balsinha, M.J., Santos, A.I., Alves, A.M.C., Oliveira, A.T.C. (2009). *Textural composition of sediments from Minho and Douro estuaries (Portugal) and its relation with hydrodynamics*, Journal of Coastal Research SI 56, 1330-1334.
- CEDEX (2004). *Estudio integral del estuario del rio Miño. Informe final*, Centro de Estudios de Puertos y Costas, Madrid, 148 p.
- Consulmar (1990). *Terminal de ferry-boats em Caminha, estudo de localização. Volume 3 - Anexo II: Estudos de hidrodinâmica e sedimentologia*, Lisboa, 66 p.
- Instituto Hidrográfico (1999). *Tabela de Marés, 2000, Volume I: Portugal*, Marinha, Lisboa, 204 p.
- Loureiro, A. (1904). *Os Portos Marítimos de Portugal e Ilhas Adjacentes*, Imprensa Nacional, Lisboa, 619 p.
- Oliveira, E.M. (2000). *Assoreamento do estuário do rio Minho. Definição de estudos a realizar*, LNEC, 25 p.
- Portela, L.I. (1996). *Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no estuário do Tejo*, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, 240 p.
- Portela, L.I. (2007a). *Estudo dos problemas de assoreamento e erosão no estuário do rio Minho. Relatório 1: Informação de base e evolução morfológica recente*, Relatório 59/07-NEC, LNEC, Lisboa, 67 p.
- Portela, L.I. (2007b). *Estudo dos problemas de assoreamento e erosão no estuário do rio Minho. Relatório 2: Modelação da hidrodinâmica, da salinidade e da dinâmica sedimentar*, Relatório 337/07-NEC, LNEC, Lisboa, 73 p.
- Universidad de Cantabria (1996). *Estudo previo de la desembocadura del Miño. Efecto de las obras en el entorno. Memoria*, Santander, 178 p.
- Vicente, C.M. (2000). *Assoreamento da foz do rio Minho. Metodologia de análise do problema*, LNEC, 3 p.