

AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR COESIVO NA RIA DE AVEIRO

Sandra COSTA¹; Ana PICADO²; Nuno VAZ³; Carlos COELHO⁴; Luís I. PORTELA⁵;
João M. DIAS⁶

RESUMO

A Ria de Aveiro sofreu alterações hidrodinâmicas e morfológicas ao longo da sua evolução, que conduziram a modificações nos padrões de circulação e sedimentares. A dinâmica dos sedimentos em suspensão reveste-se de enorme importância local, na medida em que o transporte dos sedimentos em suspensão pode provocar alterações batimétricas pontuais.

Neste trabalho foi simulada a concentração de sedimentos em suspensão na Ria de Aveiro através da utilização de um modelo numérico, efetuando-se análise da sensibilidade dos seus resultados face a diferentes cenários de caudais fluviais afluentes à Ria de Aveiro, associados a períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos, em situações extremas e médias de maré. As velocidades do escoamento, a concentração de sedimentos em suspensão e os fluxos de água e sedimentos foram determinados em secções de estudo, localizadas na entrada dos principais canais.

Os resultados evidenciaram a exportação de sedimentos da Ria de Aveiro e da sua bacia hidrográfica no sentido do oceano. O aumento dos caudais fluviais apenas induz alterações na magnitude dos fluxos sedimentares em suspensão em situação de maré viva, não ocorrendo quaisquer alterações em situação de maré morta e maré média.

Palavras-chave: Caudais fluviais; concentração de sedimentos em suspensão; fluxos sedimentares; períodos de retorno; velocidades de escoamento.

¹ Estudante de doutoramento, CESAM & Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; smcosta@ua.pt, Telefone: +351 234370049.

² Estudante de doutoramento; CESAM & Departamento de Física - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; ana.picado@ua.pt.

³ Doutor e Investigador de pós-doutoramento; CESAM & Departamento de Física - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; nuno.vaz@ua.pt.

⁴ Doutor e Professor Auxiliar; RISCO & Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; ccoelho@ua.pt, Telefone: +351 234370098.

⁵ Doutor e Investigador Auxiliar; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC; Av. Brasil, 1700-066 Lisboa, Portugal; lportela@lnec.pt, Telefone: +351 218443458.

⁶ Doutor e Professor Auxiliar com agregação; CESAM & Departamento de Física - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; joao.dias@ua.pt, Telefone: +351 234378102.

1. INTRODUÇÃO

A Ria de Aveiro localiza-se na costa ocidental atlântica de Portugal, sendo a maior laguna costeira portuguesa. Trata-se de um ecossistema com elevada sensibilidade ambiental, uma enorme variedade de habitats, de recursos naturais de elevado interesse económico e uma importante diversidade ecológica. Estas características têm contribuído para que seja um local onde, ao longo de vários séculos, se têm concentrado e desenvolvido vários aglomerados urbanos e atividades económicas, nomeadamente piscatórias, portuárias, industriais e turísticas (Costa *et al.*, 2015).

O movimento dos sedimentos coesivos num sistema estuarino pode provocar alterações batimétricas locais, que resultam em potencial risco para a navegação e dificultam as atividades das administrações portuárias, quando existem infraestruturas portuárias localizadas no seu interior. Em consequência, a avaliação do transporte sedimentar em suspensão é crucial para a previsão da evolução morfodinâmica destes sistemas costeiros. Adicionalmente, os sedimentos coesivos podem transportar poluentes, tornando a sua gestão ainda mais complexa, nomeadamente em áreas industrializadas ou urbanizadas. Por estas razões, os modelos numéricos têm sido cada vez mais utilizados na gestão de sedimentos em estuários e lagunas costeiras, para a previsão do transporte sedimentar (Coelho *et al.*, 2015).

As alterações hidrodinâmicas e morfológicas observadas na Ria de Aveiro resultaram da combinação de processos naturais e de atividades humanas, que conduziram a alterações nos padrões de circulação sedimentar. Alguns trabalhos foram já realizados no âmbito da avaliação da dinâmica dos sedimentos coesivos na Ria de Aveiro. Por exemplo, Lopes *et al.* (2006) analisaram a influência das marés e dos caudais fluviais afluentes na distribuição de sedimentos em suspensão ao longo da laguna. Abrantes *et al.* (2006) estudaram a variabilidade temporal e espacial da concentração de sedimentos em suspensão na área central da Ria de Aveiro, e a magnitude e sentido dos fluxos de água e sedimentos entre a laguna e o oceano. Dias *et al.* (2007) procuraram identificar quais as principais fontes sedimentares da Ria de Aveiro, e o tempo de residência dos sedimentos. Plecha *et al.* (2014) analisaram a dinâmica dos sedimentos em suspensão para os cenários de nível médio do mar atual e de futura subida, por efeito das alterações climáticas.

Desta forma, este trabalho pretende contribuir para o esclarecimento de algumas questões relacionadas com a dinâmica dos sedimentos em suspensão, com recurso a modelação numérica, através da simulação de diferentes cenários de afluência de caudais fluviais (para os períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos), em condições extremas (marés vivas e mortas equinociais) e médias de maré, para avaliar o impacto na velocidade do escoamento, nos fluxos de água, na concentração de sedimentos em suspensão e nos fluxos sedimentares em suspensão, em secções localizadas na entrada dos principais canais da Ria de Aveiro.

2. RIA DE AVEIRO

A Ria de Aveiro localiza-se na costa ocidental de Portugal, sendo a maior laguna costeira portuguesa (Figura 1). A Ria apresenta um comprimento máximo de 45 km e uma largura

média de 2 km. Em marés-vivas ocupa uma área total de aproximadamente 64,9 km² em maré-baixa, e 89,2 km² em maré cheia (Lopes *et al.*, 2013). O desenvolvimento dos canais segue duas direções principais, correspondendo à direção norte-sul, desde Ovar a Mira, paralelamente à linha de costa, e à direção este-oeste, comunicando com o mar por uma única embocadura. O canal artificial da embocadura apresenta cerca de 1,3 km de comprimento, 350 m de largura e 20 m de profundidade (Silva e Leitão, 2011). A laguna é um sistema com uma geometria complexa e irregular, caracterizada por uma série de canais estreitos, com um grande desenvolvimento longitudinal, organizados em sucessivas ramificações, como um sistema arborescente. Entre os canais existem significativas áreas entre-marés, que incluem as áreas de sapal e as marinhas de sal.

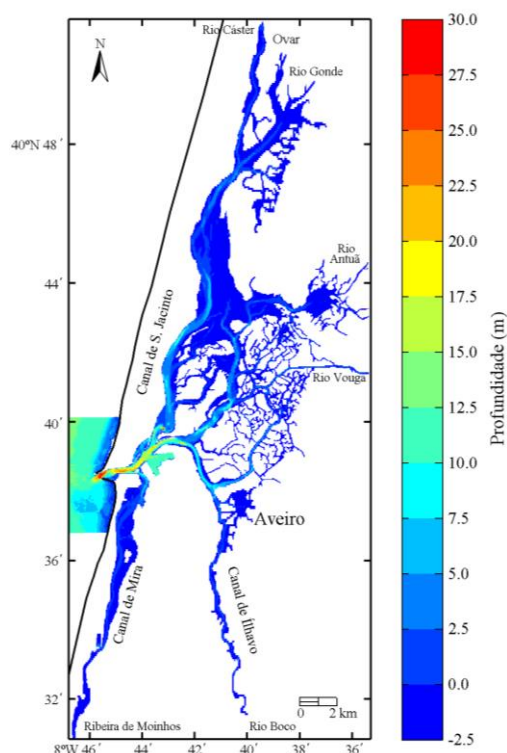


Figura 1. Localização da Ria de Aveiro, identificando os principais canais e a foz dos rios afluentes.

A Ria de Aveiro caracteriza-se por marés com uma amplitude média de 2 m na embocadura, e um máximo e mínimo de 3,2 m (marés vivas) e 0,6 m (marés mortas), respetivamente (Sousa e Dias, 2007; Plecha, 2011). A propagação da onda de maré apresenta características de uma onda progressiva amortecida, com a diminuição da amplitude e o aumento da fase (Dias *et al.*, 1999). A propagação da maré na laguna é fortemente deformada devido à geometria dos canais e à sua batimetria (Lopes e Dias, 2007). O regime de maré é caracterizado por escalas temporais periódicas, sendo as mais importantes a semidiurna (período dominante da maré) e a quinzenal (metade do mês lunar, associado a marés vivas e mortas). O período da enchente é superior ao da vazante, induzindo maiores velocidade na vazante, conduzindo a que a laguna apresente dominância de vazante (Vaz *et al.*, 2009; Plecha, 2011).

A Ria de Aveiro recebe os caudais fluviais de vários rios: Antuã, Cáster, Gonde, Boco, Ribeira de Moinhos e Vouga. No entanto, a maior contribuição é a do Rio Vouga, que

representa cerca de 2/3 dos caudais afluentes à laguna, com um caudal médio anual de aproximadamente 30 m³/s (Vaz e Dias, 2008).

Na Ria de Aveiro os sedimentos superficiais dos canais são uma combinação de areias médias e finas, com um conteúdo variável de partículas finas (siltes e argilas), que aumenta com a distância à embocadura da laguna. As zonas entre-marés são compostas na sua maioria por areias médias a finas, siltes argilosos e areias argilosas (Abrantes *et al.*, 2006; Plecha *et al.*, 2014). Os sedimentos em suspensão na Ria de Aveiro podem apresentar variações sazonais, com concentrações mais elevadas no Inverno possivelmente relacionadas com a ação do vento e a agitação (Abrantes *et al.*, 2006). As maiores concentrações de sedimentos em suspensão são observadas nas áreas mais a montante durante a vazante, dada a combinação do efeito da maré e as descargas fluviais. Por outro lado, as menores concentrações são observadas na zona da embocadura durante a enchente, revelando o efeito da propagação da maré na laguna (Plecha *et al.*, 2014).

3. MODELO NUMÉRICO

3.1 MOHID

A modelação do transporte dos sedimentos coesivos foi efetuada através da implementação do modelo numérico MOHID (www.mohid.pt). O módulo de sedimentos coesivos encontra-se acoplado ao módulo hidrodinâmico, tendo este sido previamente calibrado e validado para a Ria de Aveiro (Vaz *et al.*, 2009, 2011). Uma descrição mais detalhada da componente física do modelo poderá ser consultada em Leitão (2003).

O MOHID assume que o transporte de sedimentos coesivos ocorre apenas em suspensão. Desta forma, o transporte depende apenas da equação de advecção-difusão, com a velocidade de queda incluída na advecção vertical. A variação de massa total no domínio apenas pode ocorrer devido a entrada dos rios, trocas com o fundo e fluxos através da fronteira oceânica. As trocas entre a coluna de água e o fundo são determinadas a partir das fórmulas de erosão de Partheniades (Partheniades, 1965), descrita na equação (1), e de deposição de Krone (Krone, 1962), descrita na equação (2):

$$\frac{\partial M_E}{\partial t} = E \left(\frac{\tau}{\tau_E} - 1 \right) \text{ se } \tau > \tau_E \quad (1a)$$

$$\frac{\partial M_E}{\partial t} = 0 \text{ se } \tau < \tau_E \quad (1b)$$

$$\frac{\partial M_D}{\partial t} = CW_s \left(1 - \frac{\tau}{\tau_D} \right) \text{ se } \tau < \tau_D \quad (2a)$$

$$\frac{\partial M_D}{\partial t} = 0 \text{ se } \tau > \tau_D \quad (2b)$$

Em que τ é a tensão de arrastamento (Nm^{-2}), τ_E é a tensão crítica para a erosão (Nm^{-2}), E a constante de erosão ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$), e τ_D é a tensão crítica de deposição. Os sedimentos coesivos são erodidos do fundo quando a tensão de arrastamento excede a tensão crítica para a erosão, e depositam-se quando a tensão de arrastamento diminui para valores abaixo do valor da tensão crítica de deposição.

3.2 Implementação do modelo numérico

As simulações foram realizadas considerando uma malha com uma resolução de $40 \times 40 \text{ m}^2$ na zona central da Ria de Aveiro, e $40 \times 100 \text{ m}^2$ na restante área, e um passo de tempo de 5 s.

O modelo de transporte de sedimentos coesivos foi inicializado com um valor constante de concentração de sedimentos para toda a área da laguna de 0,01 mg/l. As simulações de estudo efetuadas foram realizadas iniciando o modelo com as previsões das concentrações de sedimentos em suspensão obtidas nas simulações anteriores. Dado não existirem valores de referência para a velocidade de queda na Ria de Aveiro, optou-se por considerar um valor constante de $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ao longo de toda a laguna. No caso das tensões críticas de erosão e deposição, não existindo valores na bibliografia, adotaram-se os valores utilizados para o estuário do Tejo (Franz *et al.*, 2014). Na Tabela 1 encontra-se um resumo dos valores adotados para os principais parâmetros usados no módulo de transporte de sedimentos coesivos.

Tabela 1. Parâmetros usados no módulo de transporte de sedimentos coesivos.

Parâmetro	Valor	Unidades
Velocidade de queda	1×10^{-5}	m s^{-1}
Constante de erosão	5×10^{-5}	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Tensão crítica de erosão	0,4	N m^{-2}
Tensão crítica de deposição	0,2	N m^{-2}

3.3 Condições de fronteira

3.3.1 Oceano

Na fronteira oceânica aberta, localizada a cerca de 5 km da Barra de Aveiro, impuseram-se as constantes harmónicas obtidas após análise harmónica (Pawlowicz *et al.*, 2002) de observações da elevação da superfície livre da água efetuadas no marégrafo da Barra. Relativamente à concentração de sedimentos em suspensão considerou-se nula, sendo que as simulações realizadas foram iniciadas com as previsões das concentrações das simulações anteriores.

3.3.2 Sistemas Fluviais

Os caudais fluviais considerados correspondem a previsões diárias de uma implementação anterior do modelo de bacia SWAT efetuadas para o clima atual (Dias *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2014). O modelo de bacia foi calibrado para os principais afluentes da Ria de Aveiro, através da comparação dos caudais observados e previstos pelo modelo (Dias *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2014). Posteriormente este foi alimentado pelos dados de precipitação observados para o clima atual (entre 1932 e 2010), permitindo a obtenção de séries diárias

de caudal para os afluentes da Ria de Aveiro (Dias *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2014). Utilizando as previsões diárias de cada um dos afluentes determinaram-se os seus máximos anuais, aos quais se ajustaram distribuições estatísticas, permitindo a determinação dos valores de caudal associados aos períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos (Tabela 2) (Dias *et al.*, 2013; 2013; Dias *et al.*, 2014).

Tabela 2. Caudais fluviais associados aos períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos, para os afluentes da Ria de Aveiro, em condições de clima atual (Dias *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2014).

	Valores médios (m^3s^{-1})	2 anos	10 anos	100 anos
Ribeira de Moinhos	14	113	221	381
Boco	4	33	63	108
Vouga	62	797	1032	1943
Antuã	5	106	173	245
Cáster	2	47	78	110

Para simulação de eventos fluviais correspondentes aos períodos de retorno, e de forma a simular situações mais próximas da realidade, foi imposto no modelo numérico o aumento gradual do caudal fluvial até ao valor máximo, durante os 7 dias anteriores à hora em que se verificou o pico de maré. Desta forma, considerou-se durante 5,5 dias um caudal constante de valor igual ao valor médio (Tabela 2), que aumentou linearmente até ao valor máximo durante 1,5 dias (Figura 2).

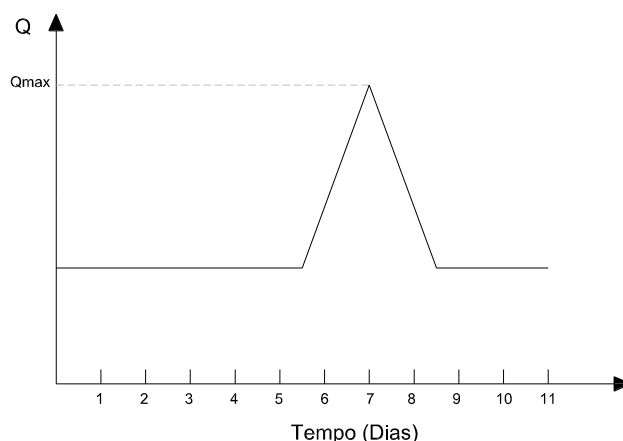


Figura 2. Variação do caudal fluvial até ao valor máximo.

Não existem dados disponíveis para os valores de concentração de sedimentos em suspensão associados à descarga fluvial dos vários afluentes que desaguam na Ria de Aveiro. Assim, a concentração de sedimentos em suspensão de cada um dos afluentes foi determinada através de testes de sensibilidade, de modo a avaliar a sua ordem de grandeza para as várias estações do ano. Esses testes de sensibilidade consistiram na variação das concentrações associadas às descargas fluviais, comparando-se posteriormente os resultados previstos pelo modelo com valores de turbidez na coluna de água, registados *in situ* para estações na Ria de Aveiro. Desta forma, obtiveram-se os valores aproximados de concentração associados às descargas fluviais em cada estação do ano, tendo-se adotado

os valores de concentração obtidos para os meses de Setembro de 2013 (maré morta) e Março de 2014 (maré viva e média), tendo-se considerado um valor constante ao longo do período de simulação (Tabela 3).

Tabela 3. Concentrações de sedimentos em suspensão (mg l^{-1}) associadas às descargas fluviais.

	Maré viva (2 de Março 2014)	Maré média (21 de Março de 2014)	Maré morta (27 de Setembro de 2013)
Ribeira de Moinhos	30	30	38
Boco	10	10	200
Vouga	150	150	200
Antuã	50	50	100
Cáster	100	100	200

4 METODOLOGIA

4.1 Secções de estudo

O transporte dos sedimentos coesivos foi determinado em cinco secções transversais, localizadas na zona central da ria, próximo da embocadura. Estas secções foram seleccionadas de forma a avaliar os principais canais da Ria de Aveiro (Figura 3).

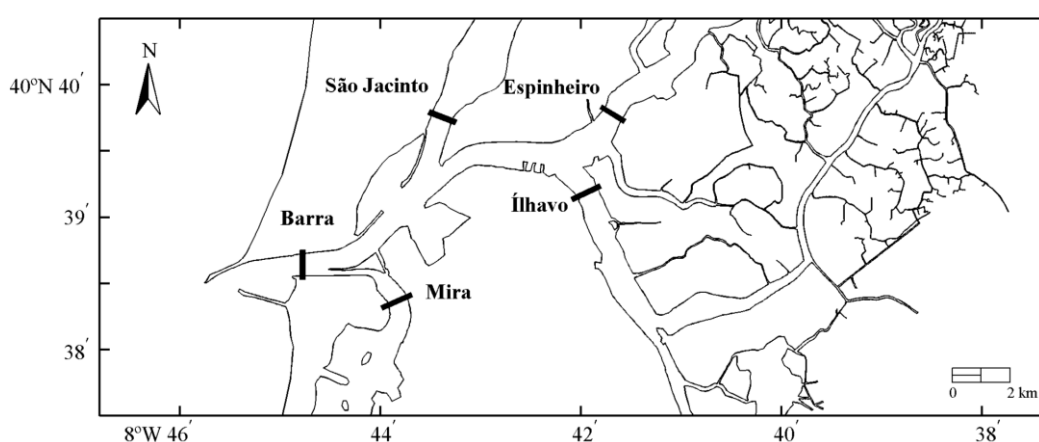


Figura 3. Localização das secções de estudo.

4.2 Fluxos de água

O fluxo de água que atravessa cada uma das secções foi determinado através do somatório do produto da velocidade do escoamento pela área, em cada uma das verticais que compõem a secção transversal, em cada instante de tempo:

$$q = \sum_{j=1}^n A_j \times v_j \quad (3)$$

Em que v_j é a velocidade do escoamento em cada instante de tempo e A_j a área da secção transversal que contribui para a vertical j .

4.3 Fluxos sedimentares

O caudal sólido em suspensão ao longo de cada vertical da secção transversal foi determinado através da equação (4):

$$q_{sj} = CSS_j \times v_j \quad (4)$$

Em que CSS_j é a concentração média de sedimentos coesivos em suspensão e v_j a velocidade média do escoamento, em cada uma das verticais que compõem a secção transversal, para cada instante de tempo. O volume de sedimentos em suspensão que atravessa a secção foi determinado através do somatório do caudal em suspensão em cada uma das verticais para cada instante de tempo (equação 5):

$$q_s = \sum_{i=1}^n q_{sj} \times A_j \quad (5)$$

Em que q_{sj} é o caudal em suspensão na vertical, em cada instante de tempo e A_j a área da secção transversal que contribui para a vertical j . O volume transportado na enchente e na vazante foi determinado através da integração no tempo, dos caudais sólidos obtidos para cada instante, nos períodos de enchente e vazante.

5. RESULTADOS

5.1 Velocidades e fluxos de água

A análise da evolução temporal da velocidade de escoamento nas secções em estudo revela que as maiores velocidades são observadas nas secções da Barra e São Jacinto. O aumento dos caudais fluviais, associados aos períodos de retorno 2, 10 e 100 anos, conduz a uma diminuição das velocidades de escoamento na enchente e ao aumento na vazante, em situação de maré morta, sendo que nas secções de Espinheiro, Ílhavo e Mira a velocidade de enchente praticamente se anula (Figuras 4 e 5).

O aumento dos caudais fluviais associados aos períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos conduz a um aumento do volume de água transportado na vazante. Os volumes de água transportados na enchente diminuem (Figuras 4 e 5).

5.2 Fluxos sedimentares em suspensão

A análise da evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão revela que as maiores concentrações se observam nas secções de Espinheiro e Ílhavo, dada a sua proximidade com a foz do Rio Vouga (Figuras 6 e 7). Verifica-se ainda que as maiores concentrações se observam na baixa-mar, enquanto as menores ocorrem na preia-mar. No entanto, esta relação deixa de se observar nas secções de Espinheiro, Mira e Ílhavo, em situações de maré morta e média, e maiores caudais fluviais afluentes (período de retorno de 100 anos), com as concentrações a apresentarem um valor aproximadamente constante no tempo.

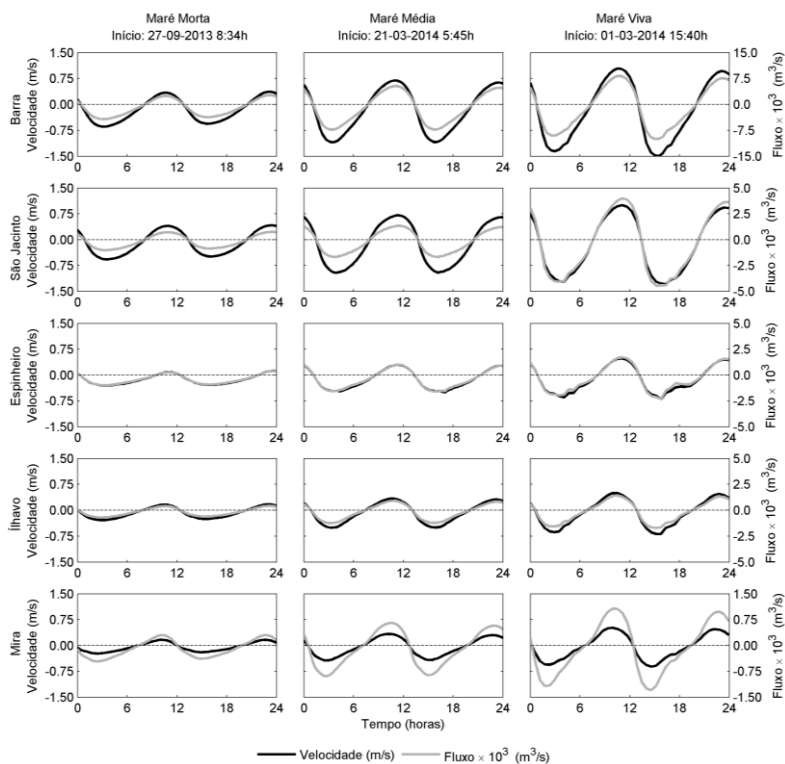


Figura 4. Variação temporal da velocidade e fluxos de água nas secções de estudo, para caudais fluviais associados a um período de retorno de 2 anos.

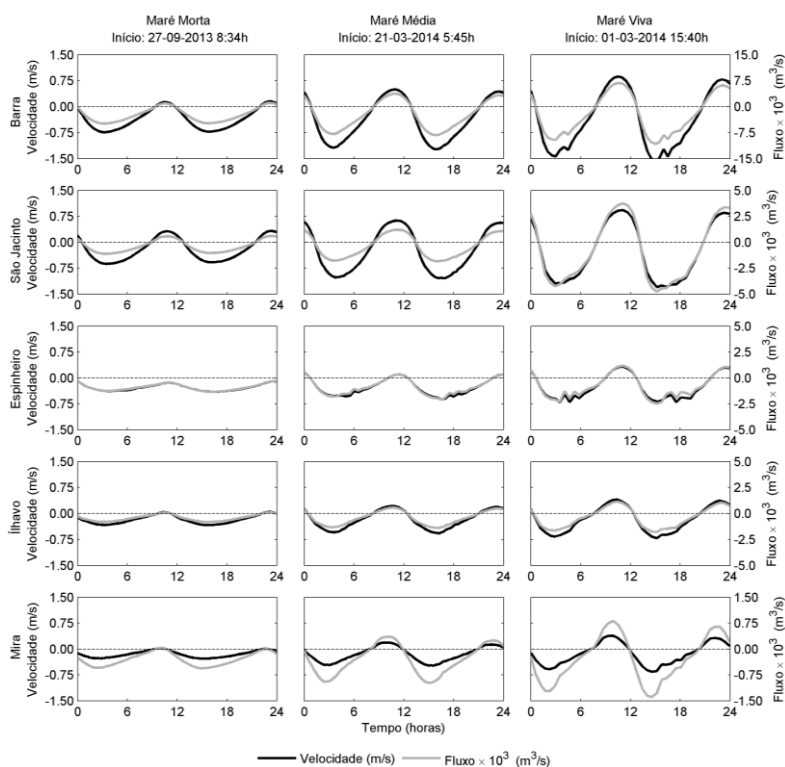


Figura 5. Variação temporal da velocidade e fluxos de água nas secções de estudo, para caudais fluviais associados a um período de retorno de 100 anos.

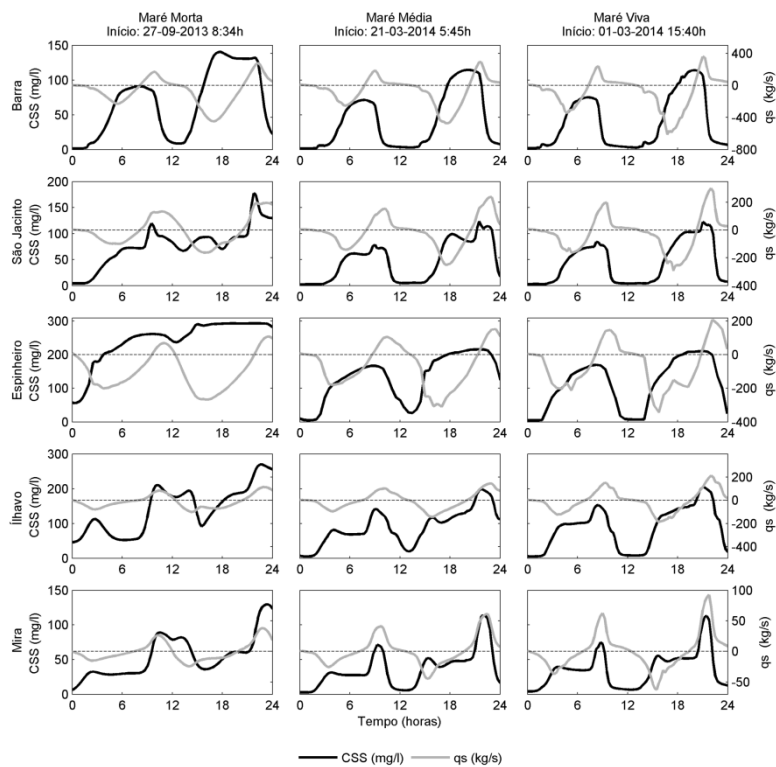


Figura 6. Variação temporal da concentração de sedimentos em suspensão e fluxos sedimentares nas secções de estudo, para caudais fluviais associados a um período de retorno de 2 anos.

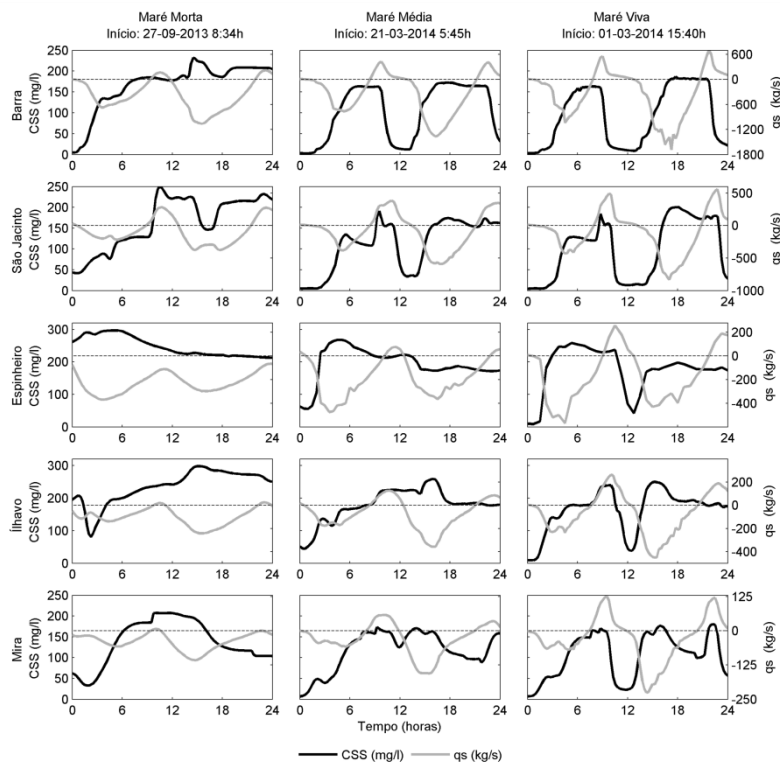


Figura 7. Variação temporal da concentração de sedimentos em suspensão e fluxos sedimentares nas secções de estudo, para caudais fluviais associados a um período de retorno de 100 anos.

Estes resultados indicam que o aumento dos caudais fluviais conduz a maiores quantidades de sedimentos a montante dos canais, que são transportados durante a vazante para as secções de Espinheiro, Mira e Ílhavo. No entanto, como as correntes de maré são menores na enchente, não conseguem mobilizar os sedimentos em suspensão, e as concentrações tendem a manter-se aproximadamente constantes.

Verifica-se que em situação de marés vivas a Ria de Aveiro exporta entre $5,5 \times 10^3$ a 20×10^3 ton de sedimentos em suspensão para o oceano, por ciclo de maré. Em situação de maré média e morta, os fluxos continuam a indicar exportação, mas com valores inferiores, de aproximadamente 560 ton (Secção Barra; Tabela 4).

Em termos globais, os resultados evidenciam que a Ria de Aveiro e a sua bacia hidrográfica exportam sedimentos no sentido do oceano. Nas secções analisadas, os balanços sedimentares são no sentido do oceano, com a exceção da secção localizada no canal de Ílhavo, em situação de maré média e morta, e qualquer um dos períodos de retorno, e no canal de Mira, em situação de maré viva e caudais fluviais para o período de retorno de 100 anos. O aumento dos caudais fluviais (períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos), em situação de maré média e maré morta, não conduz a alterações na magnitude e sentido dos fluxos sedimentares (Tabela 4).

Tabela 4. Valores dos fluxos sedimentares (ton) em enchente e vazante, nas secções de estudo.

	Período de retorno	Secção	$q_{s\text{ enchente}}$ (ton)	$q_{s\text{ vazante}}$ (ton)	Balanço (ton)
Maré viva	2	Barra	1350	-6815	-5466
		São Jacinto	1274	-3385	-2111
		Espinheiro	1139	-5109	-3969
		Ílhavo	1242	-2102	-861
		Mira	387	-579	-193
	10	Barra	1634	-11026	-9392
		São Jacinto	1606	-5024	-3418
		Espinheiro	1353	-7103	-5750
		Ílhavo	1487	3060	-1573
		Mira	433	-1385	-952
	100	Barra	2962	-23033	-20071
		São Jacinto	3219	-10919	-7701
		Espinheiro	1775	-8731	-6956
		Ílhavo	2179	-6441	-4262
		Mira	8513	-2869	5643
Maré média	100	Barra	575	-1136	-560
		São Jacinto	586	-850	-264
		Espinheiro	695	-919	-224
		Ílhavo	616	-616	0
		Mira	173	-190	-17
Maré morta	100	Barra	444	-1006	-562
		São Jacinto	414	-701	-287
		Espinheiro	568	-906	-338
		Ílhavo	501	-480	21
		Mira	136	-183	-47

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O aumento dos caudais fluviais, associados a períodos de retorno 2, 10 e 100 anos, conduz a uma diminuição das velocidades de escoamento na enchente, e ao aumento na vazante, em situação de maré média e morta, comparativamente com a maré viva. Esta situação é mais acentuada nas secções de Espinheiro, Ílhavo e Mira, para um período de retorno de 100 anos, onde a velocidade de enchente é mais baixa. Assim, os resultados sugerem que em situação de maré morta e caudal fluvial elevado, a influência da maré é menor nestas secções.

A dinâmica dos sedimentos coesivos é fortemente influenciada pela concentração de sedimentos em suspensão associada a cada descarga fluvial. As maiores concentrações de sedimentos em suspensão observam-se nas secções de Espinheiro e Ílhavo.

A concentração de sedimentos em suspensão apresenta valores máximos em baixa-mar e mínimos em preia-mar, o que sugere que durante a vazante os sedimentos provenientes das descargas fluviais são transportados até à embocadura, atingindo a concentração máxima na baixa-mar. Por outro lado, as velocidades de enchente conduzem os sedimentos provenientes dos rios para montante, contribuindo para a diminuição da respetiva concentração. No entanto, o mesmo não se observa nas secções de Espinheiro, Ílhavo e Mira, para caudais fluviais associados a um período de retorno de 100 anos, em situação de marés mortas, em que a concentração de sedimentos em suspensão apresenta um valor aproximadamente constante. Assim, nestas condições verifica-se que o caudal fluvial é a maior fonte de sedimentos em suspensão da Ria de Aveiro, mesmo nas secções próximas da embocadura, e as correntes de maré são o maior agente forçador do transporte de sedimentos em suspensão. Estes resultados estão de acordo com os apresentados por Lopes *et al.* (2006) e Plecha *et al.* (2014).

Não se verificam alterações dos balanços sedimentares em situação de maré morta e média, com valores aproximadamente constantes para os períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos. Estes resultados indicam que as correntes de maré são o maior agente forçador no transporte dos sedimentos em suspensão nestas secções, reforçando as conclusões apresentadas nos estudos de Lopes *et al.* (2006) e Dias *et al.* (2007). A influência dos rios é apenas observada em situação de marés vivas, com o aumento dos fluxos sedimentares para os períodos de retorno de 10 e 100 anos. Estes resultados justificam-se considerando que há maior quantidade de sedimentos disponíveis nos canais a montante, associados a maiores descargas fluviais, e que há mobilização de uma maior quantidade de sedimentos em suspensão associada ao aumento das correntes de maré, que promovem o seu transporte até à embocadura. Este padrão está em sintonia com os resultados do transporte residual de sedimentos para jusante obtidos por Lopes *et al.* (2006).

Os fluxos sedimentares evidenciam ainda a exportação de sedimentos da Ria de Aveiro, com os balanços sedimentares no sentido do oceano, com exceção das secções de Ílhavo, em situação de maré média e morta, e de Mira, em situação de maré viva e caudais fluviais associados a um $T=100$ anos. Outros autores já tinham observado correntes de enchente superiores às de vazante no início do canal de Mira (Abrantes *et al.*, 2006), o que pode induzir fluxos sedimentares em suspensão de enchente superiores aos de vazante.

Os valores obtidos na secção da Barra para os fluxos sedimentares em suspensão apresentam a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos por outros autores (Abrantes *et al.*, 2006).

Neste trabalho foi aplicado um modelo de transporte de sedimentos coesivos à Ria de Aveiro, para simular o impacto de caudais fluviais associados a diferentes períodos de retorno. O trabalho apresentou algumas limitações uma vez que não existe uma monitorização efetiva da evolução da concentração de sedimentos em suspensão em várias estações na área da Ria de Aveiro. Adicionalmente, tornou-se clara a necessidade de desenvolver mais estudos para compreensão dos processos de erosão e deposição dos sedimentos coesivos da Ria de Aveiro, que permitirão aumentar o conhecimento sobre o seu papel nos caudais sólidos em suspensão. No entanto, o modelo evidenciou ser promissor no estudo da dinâmica dos sedimentos coesivos.

Os resultados obtidos evidenciaram a importância dos caudais fluviais e das correntes de maré na mobilização e transporte sedimentar em suspensão na Ria de Aveiro. Ficou também evidente a importância da caracterização dos caudais sólidos fluviais, sendo necessário monitorizar as concentrações de sedimentos em suspensão associadas às descargas fluviais das linhas de água afluentes. O facto de não existir uma monitorização efetiva é um fator limitante na avaliação dos fluxos sedimentares em suspensão.

AGRADECIMENTOS

A primeira e segunda autoras deste trabalho foram apoiadas pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através de bolsas de doutoramento (SFRH/BD/77599/2011 e SFRH/BD/79920/2011). Este trabalho foi parcialmente suportado pelo Projeto BioChangeR (PTDC/AAC-AMB/121191/2010). Este trabalho foi ainda suportado parcialmente pela FCT através do CESAM (UID/AMB/50017/2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrantes I., Dias J.M., Rocha F. (2006). Spatial and temporal variability of suspended sediments concentration in Ria de Aveiro lagoon and fluxes between the lagoon and the ocean. *Journal of Coastal Research* SI39, 718-723.

Coelho C., Costa S., Portela L., Ribeiro F., Cunha R. (2015). Aveiro lagoon fine sediment laboratory tests. In *Coastal Sediments 2015*. San Diego.

Costa S., Coelho C., Portela L. (2015). Morphodynamic evolution of the Aveiro Lagoon harbor area (2001-2012), Portugal. In *Coastal Sediments 2015*. San Diego.

Dias J.M., Lopes J.F., Dekeyser I. (1999). Hydrological characterisation of Ria de Aveiro, Portugal, in early summer. *Oceanologica Acta* 22(5), 473-485.

Dias J.M., Abrantes I., Rocha F. (2007). Suspended particulate matter sources and residence time in a mesotidal lagoon. *Journal of Coastal Research* SI50, 1034-1039.

Dias J.M., Rocha A., Fortunato A.B., Lopes C.L., Rodrigues T., Ribeiro N.A. (2013). Características dos agentes forçadores de cheias. In *Riscos de cheias e estratégias de*

adaptação para a zona costeira e lagunar da Ria de Aveiro. Ed. J.M. Dias e F.L. Alves. Universidade de Aveiro, CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar. Aveiro.

Dias J.M., Lopes C.L., Coelho C., Pereira C., Alves F.L., Sousa L.P., Antunes I.C., Fernandes M.D., Phillips M.R. (2014). Influence of climate change on the Ria de Aveiro littoral: adaptation strategies for flooding events and shoreline retreat. *Journal of Coastal Research* SI70, 320-325.

Franz G., Pinto L., Ascione I., Mateus M., Fernandes R., Leitão P., Neves R. (2014). Modelling of cohesive dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 151, 34-44.

Krone R.B. (1962). Flume study of transport of sediments in estuarial processes. Final Report, H.E.L.S.E.R.L., University of California, Berkeley, California DA-04-203, CIVENG-59-2.

Leitão P.C. (2003). *Integração de escalas e de processos na modelação do ambiente marinho*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 466p.

Lopes J.F., Dias J.M., Dekeyser I. (2006). Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro Lagoon, Portugal. *Journal of Hydrology* 319(1-4), 176-198.

Lopes C.L., Azevedo A., Dias J.M. (2013). Flooding assessment under sea level rise scenarios: Ria de Aveiro case study. *Journal of Coastal Research* SI65, 766-771.

Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers and Geosciences* 28(8), 929–937.

Partheniades E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division* 91(1), 105-139.

Plecha S. (2011). *Contribution to the study of the Ria de Aveiro inlet morphodynamics*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 195p.

Plecha S., Picado A., Chambel-Leitão P., Dias J.M., Vaz N. (2014). Study of suspended sediment dynamics in a temperate coastal lagoon: Ria de Aveiro (Portugal). *Journal of Coastal Research* SI70, 604-609.

Silva A., Leitão P. (2011). Simulação da evolução das condições hidromorfológicas da Barra da Ria de Aveiro e respetivos impactes no prisma de maré. In *Actas das Jornadas da Ria de Aveiro 2011*. Ed. A. Almeida, F. Alves, C. Bernardes, J.M. Dias, N. Gomes, E. Pereira, H. Queiroga, J. Serôdio e N. Vaz. Universidade de Aveiro, CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar. Aveiro.

Sousa M.C., Dias J.M. (2007). Hydrodynamic model calibration for a mesotidal lagoon: the case of Ria de Aveiro (Portugal). *Journal of Coastal Research* SI 50, 1075-1080.

Vaz N., Dias J.M., Leitão P.C. (2009). Three-dimensional modelling of a tidal channel: The Espinheiro channel (Portugal). *Continental Shelf Research* 29(1), 29-41.

Vaz N., Dias J.M. (2008). Hydrographic characterization of an estuarine tidal channel. *Journal of Marine Systems* 70(1-2), 168-181.

Vaz N., Dias J.M. (2011). Cross sectional and stratification patterns induced by tidal and river discharge changes in a tidal channel: a modeling study. *Journal of Coastal Research* SI 64, 1614-1618.