



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

IMPACTE DA SUBIDA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR NA INUNDAÇÃO MARGINAL NO ESTUÁRIO DO TEJO

Martha Guerreiro ¹, André B. Fortunato ², Paula Freire ³, Ana Rilo ⁴, Rui Taborda ⁵, Maria da Conceição Freitas ⁶, César Andrade ⁷, Tiago Silva ⁸, e Marta Rodrigues ⁹

¹ Mestre em Oceanografia, Bolseira de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, mguerreiro@lnec.pt

² Doutor em Engenharia do Ambiente, Investigador Principal com Habilitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, afortunato@lnec.pt

³ Doutora em Geologia, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pfreire@lnec.pt

Palavras-chave: Assimetria de maré; ressonância; alterações climáticas

Tema: Modelação das zonas costeiras;

Tipo de comunicação: comunicação oral

Resumo

A inundação de zonas costeiras pela combinação da maré com sobre-elevações de origem meteorológica pode ter consequências catastróficas, o que tem motivado o desenvolvimento de mapas de risco. Vários fatores estão a agravar o risco de inundações costeiras. Enquanto a migração das populações para perto da costa aumenta a vulnerabilidade das sociedades, as alterações climáticas aumentam a perigosidade destes eventos. Nomeadamente, a subida do nível médio do mar (NMM), e o crescimento da frequência e intensidade dos temporais nalgumas zonas do globo, aumentam a probabilidade de ocorrência de níveis elevados.

O presente estudo visa determinar os níveis máximos no estuário do Tejo (Portugal) para diferentes períodos de retorno e diferentes cenários de subida do NMM, e compreender de que forma esta subida afeta a hidrodinâmica do estuário. O estudo combina um modelo hidrodinâmico com uma abordagem estatística inovadora. Para verificar se o assoreamento no estuário poderá contrariar os efeitos da subida do NMM, estimaram-se as taxas de sedimentação e erosão no último século. Esta análise indica que os sapais estão a assorear, enquanto os canais se estão a aprofundar.

Os resultados mostram que a existência de um modo de ressonância com cerca de 8 horas, que amplifica seletivamente os constituintes semi-diurnos e quarto-diurnos, torna a resposta do estuário do Tejo à subida no NMM peculiar. Esta subida afeta a assimetria da maré, em particular porque os constituintes quarto-diurnos são mais amplificados do que os semi-diurnos. Este efeito reduz



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

significativamente a forte dominância de vazante do estuário. Pelo contrário, a evolução batimétrica do estuário tem um efeito menor na assimetria da maré. Acresce que a evolução morfológica tende globalmente a reforçar os efeitos da subida do NMM na assimetria de maré. Finalmente, a subida do NMM vai amplificar a ressonância no estuário do Tejo, exacerbando aí o aumento dos níveis extremos. Este fenómeno varia espacialmente ao longo do estuário, sendo mais intenso na zona superior.



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

1. INTRODUÇÃO

A inundação de zonas costeiras pela combina o de marés de grande amplitude com sobre-elevações do nível do mar de origem meteorológica pode ter consequências humanas e materiais catastróficas. Estas catástrofes naturais, recentemente ilustradas pelo furacão *Sandy* em Nova Iorque, motivaram uma diretiva Europeia (2007/60/EC) que força os seus estados membro a desenvolver mapas de inunda o para as áreas em risco.

O risco de inundações costeiras está a agravar-se. Por um lado, a vulnerabilidade das sociedades a este tipo de perigos tende a aumentar, devido à migração das populações e das atividades econ micas para perto da costa, e por vezes a um deficiente planeamento urbano. Por outro lado, a perigosidade destes eventos aumenta devido aos efeitos das alterações climáticas. Em particular, a subida do nível médio do mar (NMM), e o crescimento da frequência e intensidade dos temporais nalgumas zonas do globo, aumentam a probabilidade de ocorrência de níveis elevados. Esta subida do NMM pode ainda ter consequências em toda a dinâmica dos estuários, incluindo a evolução morfológica e a qualidade da  gua.

Em Portugal, o estuário do Tejo tem um interesse particular. É um dos maiores da Europa, e as suas margens albergam uma percentagem significativa da população e das atividades econ micas do país. Com um dos maiores portos portugueses, este estuário é palco de intensas atividades econ micas, como o tráfego marítimo e as dragagens. Uma parte substancial do estuário está incluída no Parque Natural do Estuário do Tejo ou na sua Zona de Proteção Especial, o que testemunha o interesse ambiental deste sistema. Assim, a subida do nível médio do mar tem potenciais implicações severas a nível econ mico e ambiental.

Neste contexto, o presente estudo visa determinar os níveis máximos no estuário do Tejo (Portugal) para diferentes períodos de retorno e diferentes cenários de subida do NMM, e compreender de que forma esta subida afeta a hidrodinâmica do estuário. O estudo é baseado na combinação de um modelo hidrodinâmico (SELFE – Zhang e Baptista, 2008) com uma abordagem estatística recentemente desenvolvida (Fortunato et al., 2013). Para verificar até que ponto o assoreamento no estuário poderá contrariar os efeitos da subida do NMM, estimaram-se as taxas de sedimentação e erosão no último século através da comparação de batimetrias e da análise isotópica (^{210}Pb , ^{137}Cs) de sedimentos de sondagens curtas. Esta análise indica que os sapais estão a assorear, enquanto os canais têm estado a aprofundar.



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

2. O ESTUÁRIO DO TEJO

O estuário do Tejo está localizado na costa oeste portuguesa. Com uma área de cerca de 320 km², é um dos maiores estuários da Europa. O canal de embocadura, profundo, longo e estreito (o “corredor do Tejo”) liga o oceano Atlântico a uma zona pouco profunda (o “mar da Palha”). Em particular, os espraiaços de maré são extensos, cobrindo cerca de 40% da área do estuário. A cerca de 40 km da embocadura dá-se um estreitamento rápido do estuário. Considera-se geralmente o limite do estuário em Vila Franca de Xira, a 50 km da embocadura, onde se localiza aproximadamente o limite de intrusão salina. Os fundos são essencialmente constituídos por sedimentos lodosos e areias, de origem fluvial (zona superior) e oceânica (zona inferior).

O regime de maré é mesotidal, com amplitudes entre 0.55 e 3.86 m na costa (Cascais). Devido a um fenómeno de ressonância, as constituintes semi-diurnas da maré são significativamente amplificadas no interior do estuário (Fortunato *et al.*, 1999). Simultaneamente, a duração das vazantes é significativamente inferior à das enchentes devido à extensão dos espraiaços de maré (Fortunato *et al.*, 1999). O caudal médio é de 368 m³/s (Neves, 2010), valor para o qual o estuário é bem misturado. No entanto, situações de estratificação têm sido observadas para caudais elevados (Neves, 2010). Os caudais fluviais podem ter um efeito significativo nos níveis, mas apenas na zona superior do estuário, a montante dos mouchões (Vargas *et al.*, 2008); a jusante os níveis são controlados fundamentalmente pela maré.

Ao longo das margens do estuário, encontra-se uma grande diversidade de ocupação antropogénica. Com o aumento da população e o desenvolvimento da atividade portuária, as margens tem sofrido várias intervenções com a construção de infra-estruturas de apoio a atividades náuticas, zonas industriais, zonas agro-pecuárias e áreas urbanas. Estes fatores têm aumentado a pressão sobre a orla estuarina e restringido as margens, não permitindo a sua evolução natural.

Devido à sua localização próxima de várias rotas de comércio internacional, o estuário do Tejo tem o principal terminal de transporte marítimo de Portugal. Mais de 3000 navios de grandes dimensões fazem escala anualmente no Porto de Lisboa, que se destaca pelas atividades comerciais e mercantis e pela atividade turística. A atividade náutica obriga à manutenção de condições de navegabilidade, com o recurso a frequentes dragagens de manutenção.

CENÁRIOS

Subida do NMM

Ao longo do século 20, o nível médio do mar (NMM) na costa portuguesa subiu cerca de 0.15 m (Antunes e Taborda, 2009), um valor consistente com estimativas globais (e.g. Church e White, 2006;



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

Hagedoorn *et al.*, 2007). Esta concordância deriva de um ajustamento isostático e de movimentos verticais na região desprezáveis (Antunes e Taborda, 2009). Assim, a futura subida do NMM nesta região podem ser baseadas em estimativas globais.

A magnitude da futura subida do NMM é controversa na comunidade científica, e as projeções envolvem uma grande incerteza. A maioria das estimativas para a subida do NMM até ao fim do século 21 publicadas depois do último relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (Solomon *et al.*, 2007) variam entre 0.2 e 2 m (Rahmstorf, 2010). As discrepâncias estão relacionadas não apenas com incertezas na determinação das futuras temperaturas globais, mas também com dificuldades na avaliação da contribuição do degelo e incertezas sobre a dinâmica das massas de gelo da Antártida e da Groenlândia. Neste contexto, foram definidos dois cenários de subida do NMM: a “melhor estimativa” (0.5 m), que corresponde ao valor central das diferentes estimativas publicadas depois de 2007, e um valor pessimista (1.5 m), aceite como adequado para uso em gestão costeira, uma vez que satisfaz o princípio da precaução. O NMM atual foi estimado em 2.21 m acima do ZH.

Assoreamento

Os dados batimétricos do estuário disponíveis, datando de 1928/32, 1964, 1981, 2009 e 2011, foram analisados e utilizados para construir modelos digitais de terreno. A comparação destes modelos permitiu determinar taxas de sedimentação. As áreas intertidais tem taxas de assoreamento de cerca de 0.3 cm/ano. Pelo contrário, os principais canais mostram uma ligeira tendência para a erosão (em média 0.1 cm/ano) que reflete em parte a dragagem dos canais. As taxas de sedimentação foram também inferidas para nas zonas marginais em vários locais, através da extrapolação de perfis verticais isotópicos (^{210}Pb , ^{137}Cs) em cores de sedimentos. Os resultados indicam que as taxas de sedimentação nessas áreas variam entre 0.7 e 2.2 cm/ano, com os valores mais elevados a ocorrer na zona superior do estuário (Silva *et al.*, 2013). Um mapa das taxas de sedimentação foi construído através da integração de toda esta informação e utilizado para projetar batimetrias futuras (Figura 1).

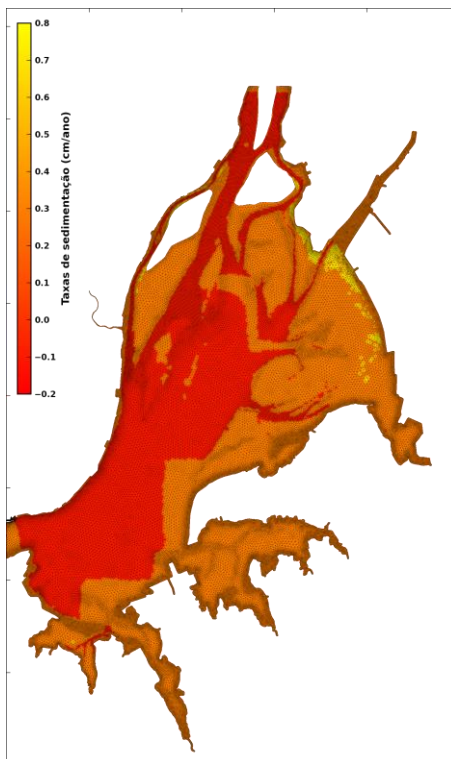


Figura 1 – Taxas de assoreamento da zona superior do estuário do Tejo.

Níveis extremos

As inundações marginais de origem marítima ou fluvial constituem uma preocupação crescente, devido às perdas humanas e aos danos materiais que podem causar. Por exemplo, a Diretiva Quadro das Inundações obriga atualmente os estados membros da União Europeia a desenvolverem mapas de inundação para zonas em risco. Em zonas estuarinas, estas inundações devem-se ao efeito combinado da maré e das sobre-elevações de origem meteorológica. Com a subida do nível médio do mar, as inundações em margens estuarinas agravar-se-ão. No caso particular do estuário do Tejo, a amplificação da maré por ressonância pode exacerbar este problema. A análise do efeito da subida do nível médio do mar nas inundações marginais neste estuário é por isso particularmente relevante.

A determinação dos forçamentos em situações extremas segue aqui a abordagem desenvolvida por Fortunato *et al.* (2013). Esta abordagem visa determinar simultaneamente os níveis correspondendo a vários períodos de retorno e as séries temporais que os incluem. Estas séries são posteriormente usadas para forçar o modelo hidrodinâmico do estuário e determinar mapas de inundação.

A determinação das séries temporais para vários períodos de retorno parte de um conjunto de medições de níveis, tão extenso quanto possível. Neste caso, partiu-se dos dados medidos no marégrafo



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

de Cascais entre 1961 e 2005, tendo-se retido 24 anos em que as falhas nas medições não foram consideradas limitativas. Através de análise harmónica, separam-se três componentes nestes registos: o nível médio anual, a maré astronómica e o resíduo, correspondente ao sinal de origem atmosférica. A partir destes três sinais assim separados, construíram-se depois novas séries anuais somando de diferentes formas os três sinais iniciais:

1. O nível médio, determinado para um ano específico (presente) ou para um cenário de subida do nível médio do mar.
2. A maré astronómica para um conjunto de 19 anos consecutivos. Desta forma, teve-se em conta o ciclo de variabilidade da maré, de cerca de 18,7 anos.
3. Os resíduos, com desfasagens variáveis relativamente à maré. Estas desfasagens variam com intervalos de uma hora entre mais e menos 15 dias, garantindo assim que uma determinada sobre-elevação medida possa ocorrer em qualquer instante no ciclo de maré viva-maré morta.

Através destas combinações obteve-se, para um determinado nível médio do mar, um número muito elevado de séries anuais. No caso presente, são 328.320 (i.e. $24 \times 19 \times 30 \times 24$) séries anuais hipotéticas. O conjunto dos máximos de cada uma destas séries permite determinar a função de densidade de probabilidade de ocorrência (P) de um determinado nível (z).

Os métodos tradicionais de análise de extremos trabalham com números reduzidos de observações (tipicamente, algumas dezenas de anos). Tem por isso de ajustar funções de distribuição estatísticas aos dados para permitirem extrapolar os níveis máximos para períodos de retorno elevados. Pelo contrário, a abordagem resumida acima conduz a um número suficientemente grande de séries anuais para permitir evitar a utilização de funções analíticas. Finalmente, o período de retorno associado a um determinado nível é dado por $T(z) = 1/(1-P(z))$ (Figura 2a). Os valores obtidos são superiores aos obtidos por Andrade et al. (2006) (Quadro 1). Fortunato et al. (2013) observa uma diferença semelhante entre os extremos obtidos por este método e por um método tradicional, e mostra que o novo método é o mais preciso.

A determinação das séries usadas para forçar o modelo passa por escolher, de entre o conjunto de 328320 séries geradas, aquelas que têm um nível máximo correspondente ao período de retorno escolhido. As séries deste subconjunto são desfasadas de modo a fazer coincidir o valor máximo, é feita uma média, e finalmente são usados *splines* cúbicos para produzir uma série com o passo de cálculo do modelo (Figura 2b).

Finalmente, note-se que esta abordagem apenas permite determinar os níveis máximos associados a eventos de origem marítima. No entanto, Vargas et al. (2008) mostra que os caudais do Tejo têm uma influência desprezável nos níveis máximos no estuário a jusante dos mouchões.

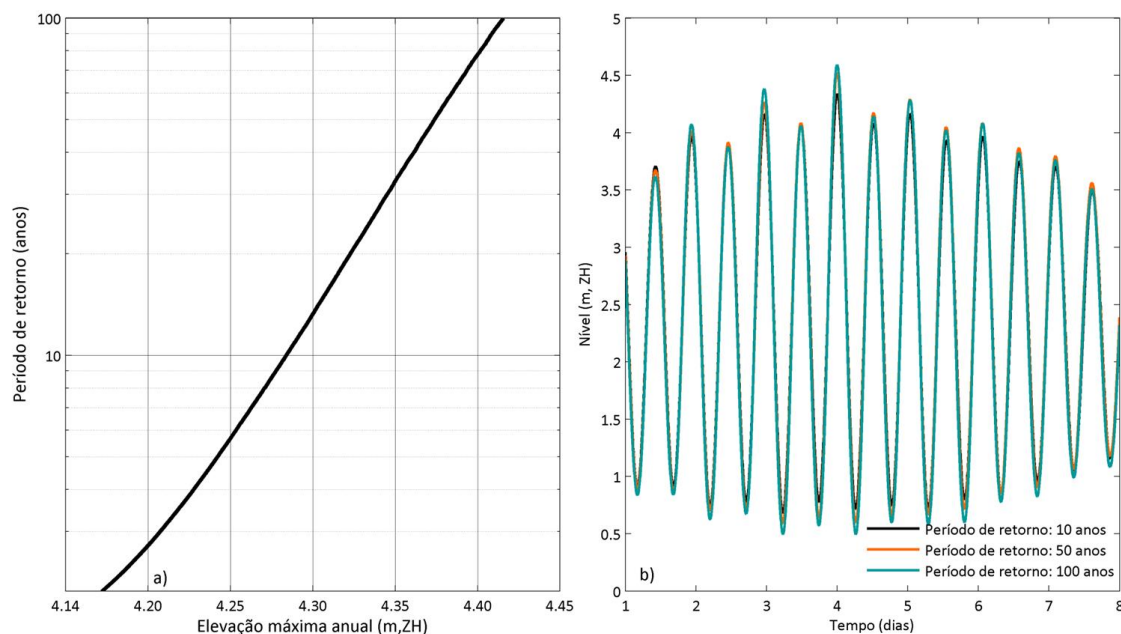


Figura 2 – Determinação das condições de fronteira para o modelo hidrodinâmico: a) níveis máximos no marégrafo de Cascais para vários períodos de retorno para 2012; b) séries temporais geradas para forçar o modelo.

Quadro 1 – Comparação de níveis máximos (m, ZH) obtidos pelo presente método e pelo método tradicional (fonte: Andrade *et al.*, 2006).

Método	Período de retorno (anos)				
	5	10	25	50	100
novo	4.24	4.28	4.33	4.37	4.42
tradicional	4.1	4.2	4.3	4.3	4.4

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO

Descrição do modelo

O SELFE – *Semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element* (Zhang e Baptista, 2008) é um modelo de circulação baroclínico tri-dimensional. Resolve as equações de águas pouco profundas para as elevações e as velocidades, equações de conservação de sal e calor e permite escolher entre vários esquemas de fecho de turbulência. Neste estudo, foi utilizada a versão bidimensional barotrópica (Zhang *et al.*, 2011). O SELFE utiliza malhas computacionais triangulares não estruturadas, o que o torna particularmente adequado a problemas com escalas espaciais diferenciadas e geometrias complexas. A utilização de um algoritmo Euleriano-Lagrangiano semi-implícito de elementos finitos, que permite utilizar passos de cálculo elevados, e a paralelização do código garantem uma grande eficiência numérica.



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

Aplicação, calibração e validação

Desde a década de 1980 que têm vindo a ser implementados modelos hidrodinâmicos do estuário do Tejo. Regra geral, têm sido aplicados modelos barotrópicos, uma vez que o estuário é bem misturado ou parcialmente misturado exceto em situações de cheia (Neves, 2010). Uma das principais limitações destes modelos tem sido a resolução horizontal, insuficiente para resolver adequadamente todos os canais (Fortunato e Oliveira, 2000). Neste trabalho optou-se por isso por utilizar um modelo 2D barotrópico e desenvolver uma malha de cálculo com uma resolução significativamente mais elevada do que a utilizada em estudos anteriores.

O domínio horizontal foi representado por uma malha não estruturada que se estende desde a zona de Santarém até o oceano aberto (Figura 3). As fronteiras laterais da malha, na zona estuarina, foram definidas através da Linha de Máxima Preia-Mar em Águas Vivas equinociais (LMPMAV) delineada por Rilo *et al.* (2012). Esta malha representa em detalhe todo o domínio, especialmente ao longo das margens e canais, é constituída por cerca de 77300 nós e tem um espaçamento entre 25 e 2000 m. Esta resolução permite analisar em pormenor a inundação das margens assim como representar corretamente os vários pequenos canais existentes no estuário. Apesar dos vários estudos realizados no Tejo, não existe um levantamento atual de todo o estuário. Como tal, os dados de batimetria utilizados combinam vários levantamentos, efetuados entre 1964 e 2011.

Foram efetuadas simulações de 30 dias, com um passo de cálculo de 30 s. O modelo foi forçado ao longo da fronteira oceânica por 6 constituintes harmónicas (Z0, M2, S2, N2, K1, O1), e por um caudal constante de 515 m³/s na fronteira fluvial. Este valor corresponde ao caudal médio do Tejo em 1972. Este ano foi escolhido dado ser o único para o qual existe um conjunto de dados de maré em todo o estuário que permite uma validação detalhada do modelo. Apesar de existirem outros afluentes (*e.g.* Rio Sorraia, Rio Trancão), os seus caudais são desprezáveis e não foram considerados nas simulações.

O atrito de fundo foi parametrizado através de uma fórmula de Manning. Utilizou-se um coeficiente de Manning variável no espaço em que se teve em conta o tipo de sedimentos presentes no fundo do estuário (Freire, 2003). Os valores deste coeficiente variam entre 0.015 e 0.023 m^{1/3}/s.

O modelo foi calibrado com as séries temporais da síntese harmónica dos dados de elevação para o mesmo período de simulação. Estes registos localizam-se em 13 estações maregráficas ao longo das margens do estuário (Figura 4a). Os erros quadráticos médios (EQM) são muito baixos (Figura 4b).

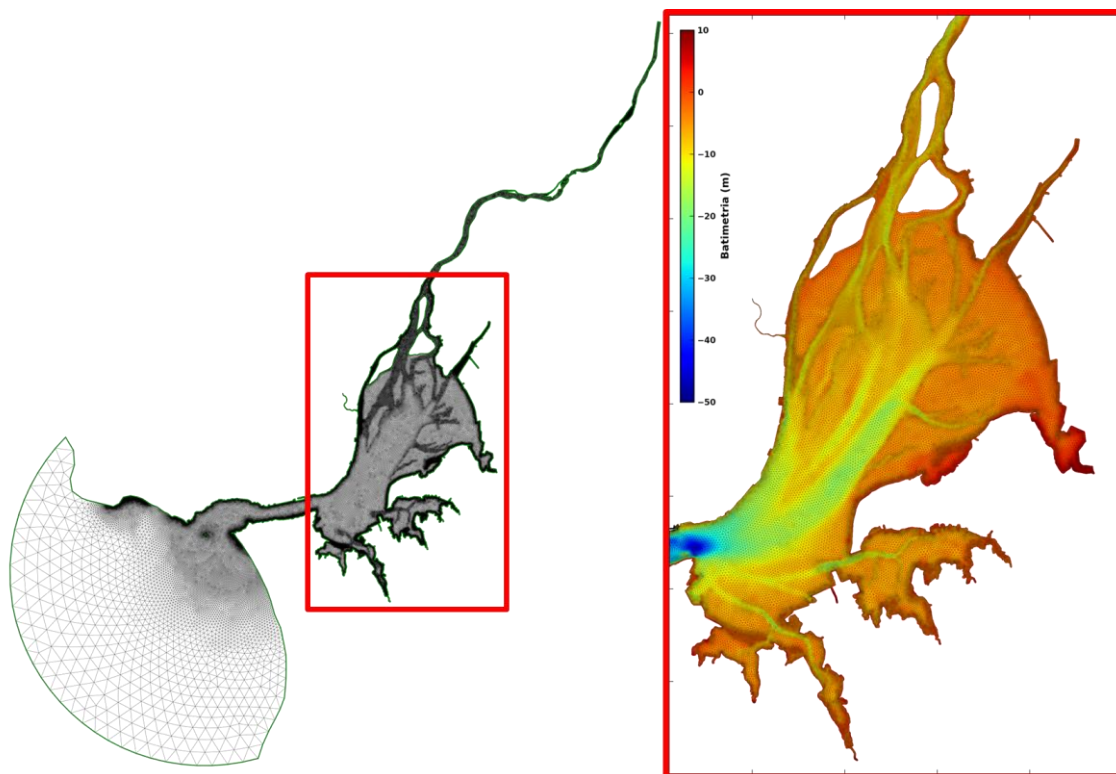


Figura 3 – Malha de cálculo e batimetria da zona superior do estuário.

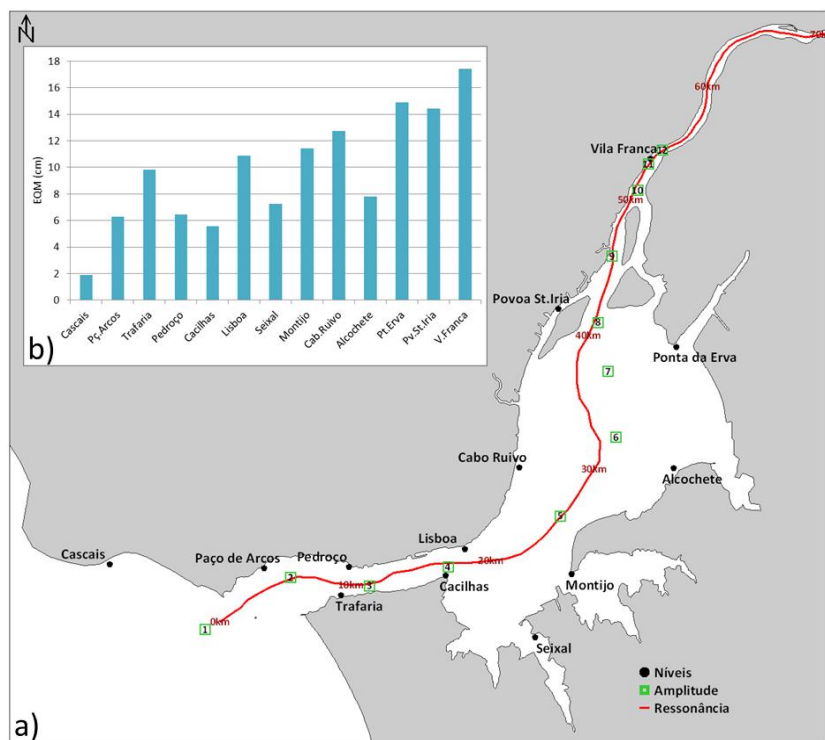


Figura 4 – Validação do modelo hidrodinâmico: a) localização das estações; b) erros. A linha a vermelho é utilizada mais à frente na análise de resultados.

Resultados e discussão

A amplitude e fase da maré são afetadas por vários fatores, tais como a configuração da margem, a batimetria e o caudal fluvial. Alguns destes fatores são influenciados pela ação antropogénica, como por exemplo a construção de infra-estruturas que limitam e alteram as margens dos sistemas costeiros. Os seguintes resultados apresentam o efeito da subida do nível médio do mar na alteração das características da onda de maré no estuário do Tejo. São também apresentados resultados relativos à alteração da batimetria do estuário devido às taxas de sedimentação para uma escala temporal de 50 e 100 anos.

Assimetria de maré

As marés oceânicas são geralmente simétricas, i.e. as enchentes e vazantes têm durações semelhantes. Os processos não lineares, importantes em zonas pouco profundas, geram constituintes harmónicas de alta frequência que tornam a maré assimétrica (Dronkers, 1964; Aubrey & Speer, 1985). Tipicamente, os estuários têm durações de enchentes inferiores às das vazantes quando o quociente entre a amplitude



de maré e a profundidade é elevado. Pelo contrário, a existência de extensas zonas intertidais favorece as vazantes mais curtas (Fortunato e Oliveira, 2005), como acontece no estuário do Tejo (Fortunato *et al.*, 1999).

A assimetria da maré é particularmente relevante para dinâmica sedimentar. Vazantes mais curtas promovem velocidades mais elevadas na vazante do que na enchente. Diz-se então que o estuário é dominado pela vazante. Como os fluxos sedimentares dependem de uma potência elevada da velocidade (tipicamente 3 a 5, dependendo do transporte ocorrer maioritariamente por arrastamento ou em suspensão), um estuário dominado pela vazante terá facilidade em exportar sedimentos. Pelo contrário, um estuário dominado pela enchente terá mais tendência a assorear.

Uma vez que a subida do nível médio do mar afetará a geração de constituintes harmónicas por processos não-lineares, é importante perceber o efeito que terá na assimetria da maré. De forma a verificar o efeito da subida do nível do mar na assimetria de maré, foi calculado a diferença entre as durações da enchente e da vazante ao longo do estuário até Vila Franca (Figura 4a). A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para a assimetria de maré, para os vários cenários de subida do nível médio e alteração de batimetria para 50 e 100 anos.

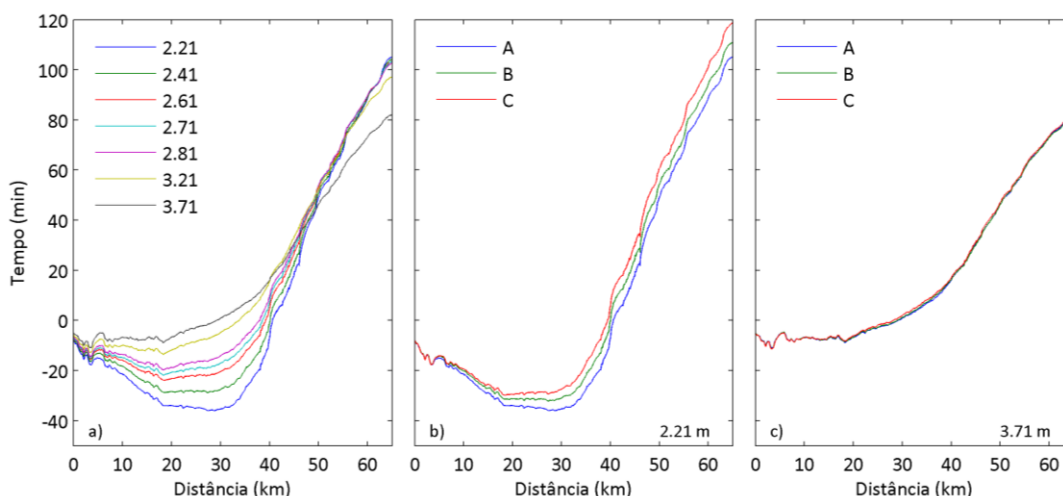


Figura 5 – Diferença entre as durações da vazante e da enchente ao longo do eixo do estuário representado na Figura 4a, para vários cenários de subida do NMM e cenários de assoreamento: a) resultados para vários cenários de subida do NMM para a batimetria original; b) e c) resultados para diferentes batimetrias (A: batimetria original, B: batimetria para 50 anos e C: batimetria para 100 anos) para o cenário atual de NMM e para o cenário mais dramático previsto para a subida do NMM (3,71 m).

Os resultados do modelo confirmam que o estuário é dominado pela vazante até ao km 40 (Fortunato *et al.*, 1999) e mostram que é dominado pela enchente a montante. A subida do NMM irá alterar a



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

assimetria da maré, podendo tornar quase todo o estuário dominado pela enchente. Assim, é expectável que a subida do NMM venha a acelerar o assoreamento que atualmente se verifica no estuário.

Relativamente ao efeito da subida do nível médio do mar, a evolução batimétrica terá um impacto modesto na assimetria da maré. Só se ocorrer uma alteração drástica na batimetria, inesperada face às taxas de assoreamento observadas, é que esta terá uma importância significativa.

Ressonância

A propagação da maré no interior de um estuário pode ser acompanhada de uma forte amplificação quando o período característico da maré é semelhante ao período próprio do estuário. Este fenómeno, denominado ressonância, consiste na sobreposição de duas ou várias ondas com a mesma frequência, criando uma onda parcialmente estacionária. A sobreposição das ondas incidente e refletida resulta no aumento da amplitude da maré, principalmente nas zonas a montante onde o estuário estreita (Miranda et al., 2002). A ressonância da maré tende a ocorrer em estuários de grandes dimensões (em profundidade e comprimento), dado que o período de ressonância aumenta com as dimensões do estuário. De forma muito aproximada, o período de ressonância é dado por $T=4L/(gH)^{0.5}$, onde L é o comprimento do estuário, H a sua profundidade média e g a gravidade. A aplicação desta expressão ao estuário do Tejo, no entanto, subestima significativamente o período de ressonância (Neves, 2010).

A amplificação da maré resulta num maior prisma de maré e numa maior renovação do volume de água do estuário. A ressonância implica também menores tempos de residência, mas também uma maior intrusão salina.

O estuário do Tejo, devido às suas características físicas, apresenta este tipo de fenómeno. Fortunato *et al.* (1999) mostrou que o período de ressonância para neste estuário é de cerca de 8 horas, e verificou que as constituintes semi-diurnas ainda são significativamente amplificadas na zona superior do estuário.

Para estudar o efeito da subida do NMM na ressonância da maré no estuário do Tejo, foram realizadas simulações para todos os cenários definidos, forçadas por ondas de 1 m de amplitude e diferentes períodos (entre 3 e 19 horas) na fronteira oceânica. Dos resultados obtidos, calculou-se a amplitude para cada constituinte para vários pontos ao longo do estuário, representados na Figura 4. Os resultados confirmam que o período de ressonância deste estuário é de cerca de 8 horas, e que as ondas com períodos entre 6 e 18 horas são significativamente amplificadas entre Cacilhas e Vila Franca de Xira (Figura 6).

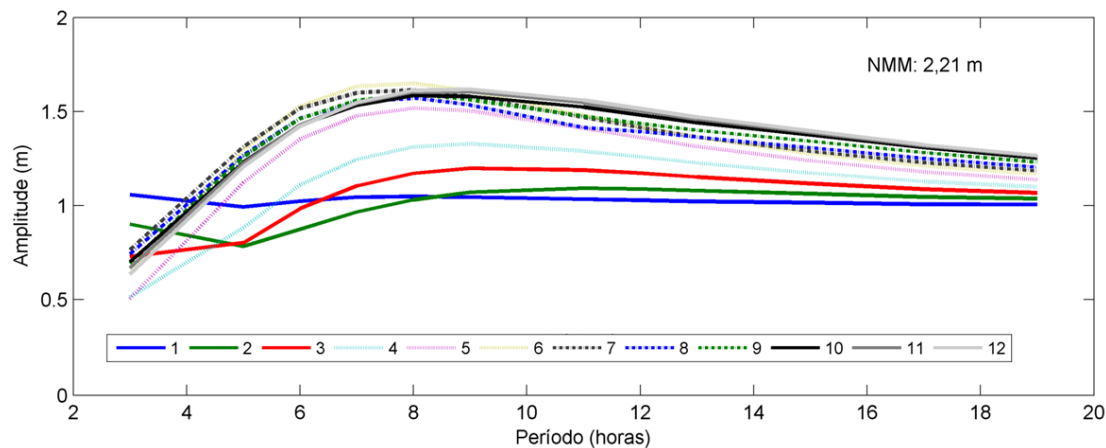


Figura 6 – Efeito da ressonância ao longo do estuário para a situação actual.

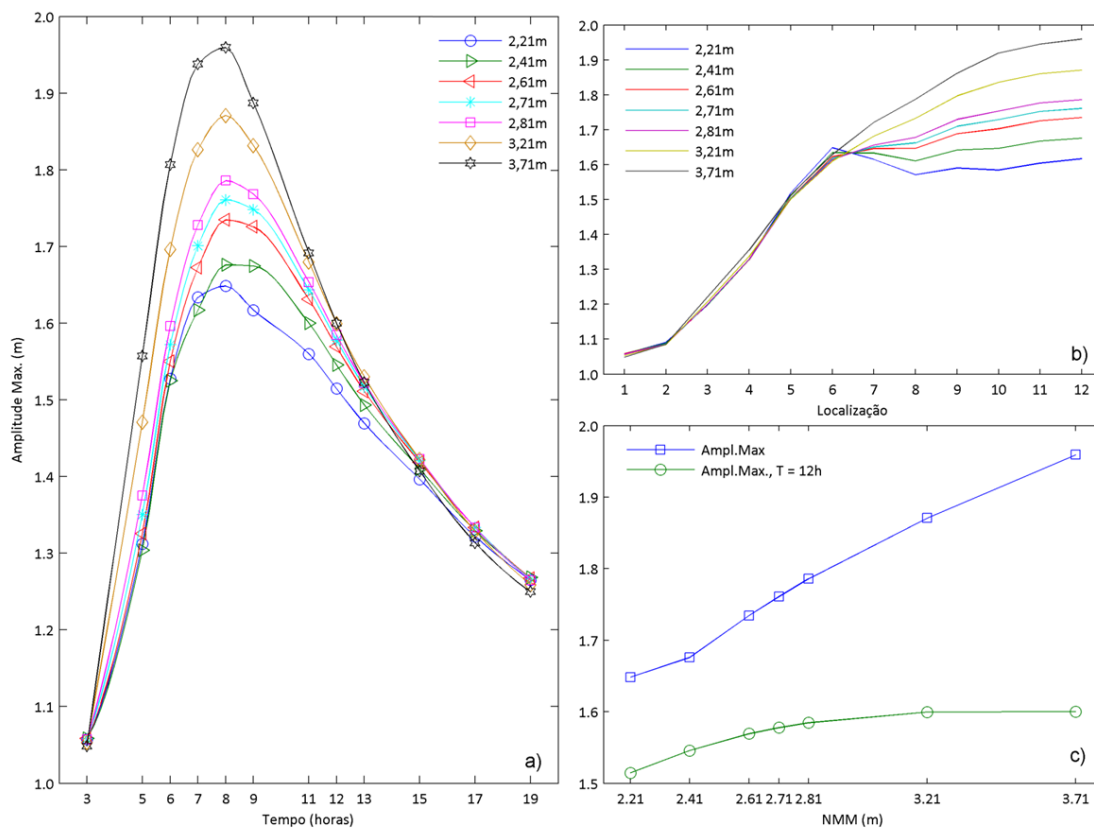


Figura 7 – Efeito da subida do NMM na ressonância no estuário do Tejo: a) amplitude máxima para todos os cenários de subida do NMM e períodos; b) amplitude máxima obtida ao longo do estuário (a localização dos pontos encontra-se na Figura 4); c) amplitude máxima obtida em todos os períodos e para o período de 12 horas.



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

Os resultados mostram que a subida do NMM aumentará a amplificação das ondas de maré no estuário para toda a gama de frequências testadas (Figura 7a). Para o atual nível médio do mar (2,21 m ZH), a amplificação máxima é de 65% nas regiões a montante e para o período próprio do estuário. Para o caso mais gravoso, i.e. o NMM a 3,71 m ZH, esta amplificação aumenta para 95%. No entanto, o aumento da amplificação das ondas com a subida do nível médio do mar não é uniforme para todas as frequências. Em particular, para as constituintes semi-diurnas, a amplificação cresce de forma assintótica. Para uma subida do NMM da ordem de 1 m, a amplificação máxima estará aproximadamente atingida (Figura 7c).

O efeito da subida do NMM na ressonância não se fará sentir de forma uniforme em todo o estuário. Com efeito, da secção Cabo Ruivo – Alcochete para jusante, o efeito da subida do NMM na ressonância é desprezável, fazendo-se sentir apenas para montante (Figura 7b). Este fenómeno deve-se provavelmente às menores profundidades do estuário a montante, que fazem com que a alteração relativa da profundidade média com a subida do NMM seja mais significativa nesta zona do estuário.

Inundação

As inundações marginais no estuário do Tejo podem ter efeitos nefastos. Algumas zonas marginais urbanas, como o Seixal, são baixas, pelo que os potenciais custos materiais e humanos de uma inundação são elevados. Na zona superior do estuário, com extensas zonas agrícolas, a inundação pode causar a salinização de terrenos férteis. Com a subida do NMM, a frequência de inundações de origem marítima deverá aumentar. No caso particular do estuário do Tejo, este problema deverá ser exacerbado pelo aumento da amplificação da maré devido à ressonância.

Os resultados das simulações confirmam a importância da subida do NMM e da ressonância na inundação estuarina (Figura 8). Devido à ressonância, os níveis máximos têm um forte crescimento entre Cacilhas e a secção da ponte Vasco da Gama e crescem mais depressa do que o nível médio do mar.

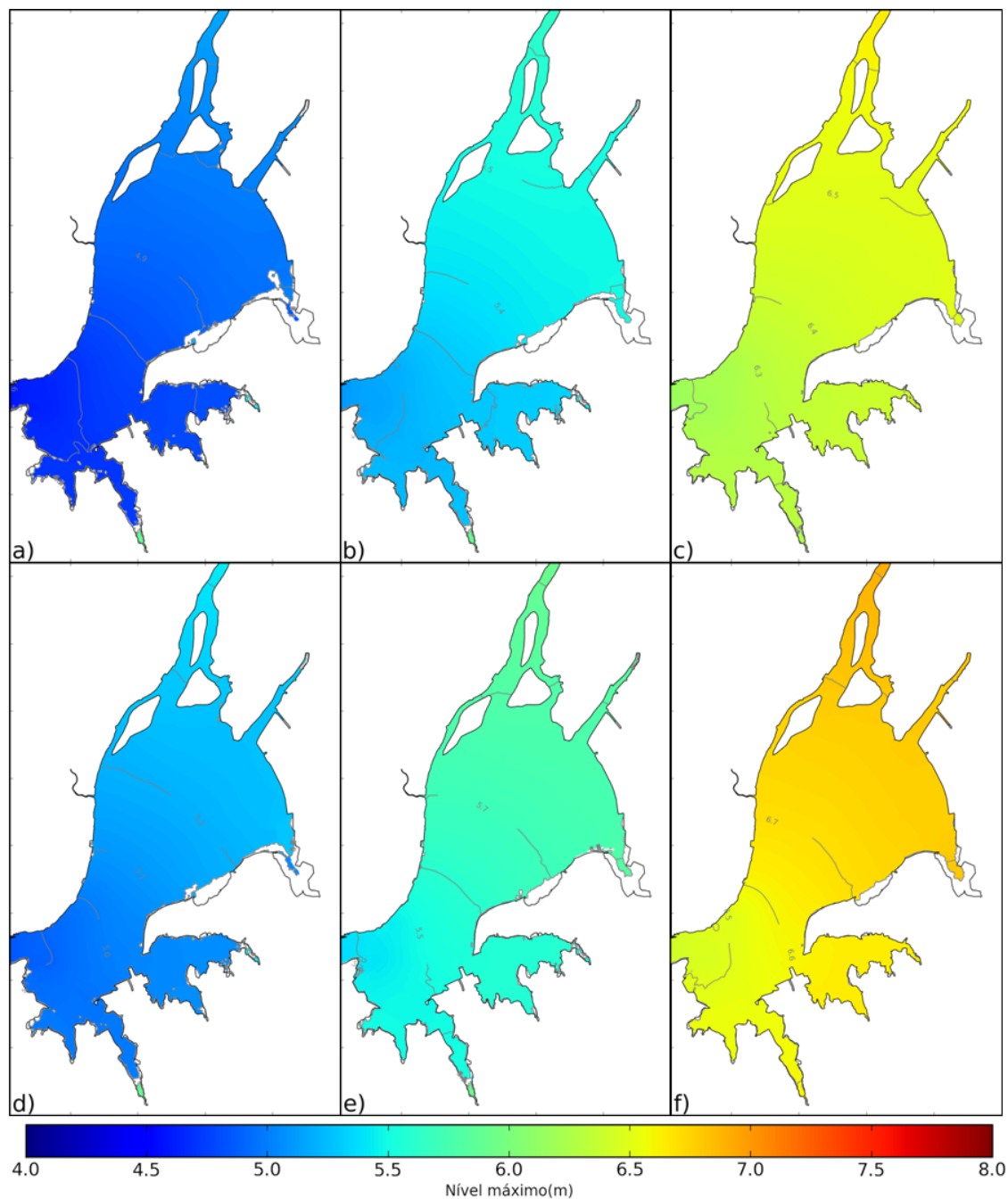


Figura 8 – Mapas de inundação para os vários cenários de subida do nível médio do mar e períodos de retorno: a) 2.21m e 10 anos; b) 2.71m e 10 anos; c) 3.71m e 10 anos; d) 2.21m e 100 anos; e) 2.71m e 100 anos; g) 3.71m e 100 anos.



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

CONCLUSÕES

As alterações climáticas terão impactes nos estuários. Estes impactes devem ser antecipados para permitir a definição de medidas de mitigação com custos controlados, e para informar decisões sobre intervenções no estuário (e.g., a construção de infraestruturas). O presente artigo contribui para esta antecipação para o caso concreto do estuário do Tejo.

As simulações apresentadas mostram que a subida do nível médio do mar terá efeitos significativos na hidrodinâmica estuarina. Estes efeitos são particularmente significativos no caso do estuário do Tejo devido à ocorrência de um fenómeno de ressonância, que amplifica as constituintes quarto-diurnas e semi-diurnas. Assim, a subida do NMM terá dois efeitos diretos principais:

1. O Tejo é dominado pela vazante, i.e., tem vazantes mais curtas do que as enchentes. A subida do NMM vai afetar significativamente a assimetria de maré, em particular porque as constituintes quarto-diurnas são mais amplificadas do que as semi-diurnas. A principal consequência será a redução da dominância de vazante.
2. A subida do NMM reforçará a ressonância no estuário do Tejo, aumentando a amplificação da maré. Em resultado deste aumento, os níveis máximos no estuário terão um aumento superior àquele que ocorrerá no mar.

As consequências indiretas destes fenómenos, positivas e negativas, deverão ainda ser investigadas em detalhe. No entanto, podem desde já ser avaliadas qualitativamente.

Por um lado, o aumento da amplitude de maré conduzirá a maiores prismas de maré. Reduzirá a estratificação salina que se observa em condições de caudais elevados. Reduzirá os tempos de residência, contribuindo assim para melhorar a qualidade da água. Aumentará a intrusão salina, com potenciais consequências negativas na utilização de água para rega e fins industriais (e.g., refrigeração de centrais térmicas). O aumento do prisma de maré poderá ainda reduzir o esforço de dragagem do canal da barra.

Por outro lado, a redução da assimetria de maré deverá aumentar a tendência de retenção de sedimentos no estuário, aumentando assim as taxas de assoreamento globais no estuário. Não é claro no entanto como serão afetadas estas taxas localmente, nada indicando que o aumento seja espacialmente uniforme.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, projetos MorFeed (PTDC/AAC-AMB/100092/2008), AdaptaRia (PTDC/AAC-CLI/100953/2008) e Molines (PTDC/AAC-AMB/??/2012), e



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

bolsas SFRH/BSAB/1308/2012 (AF), SFRH/BD/41033/2007 (MR). Agradece-se ainda a disponibilização do modelo SELFE aos seus autores.

Referências

- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Taborda, R., e Freitas, M.C., 2006. Alterações climáticas em Portugal. Cenários, impactes e medidas de adaptação. Projecto SIAMII, Zonas costeiras, F.D. Santos e P. Miranda (eds.), Gradiva, Lisboa.
- Antunes, C. e Taborda, R., 2009. Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56, 218 – 222.
- Aubrey, D.G. e Speer, P.E., 1985. A Study of Non-linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems. Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 21, 185–205.
- Church, J. e White, N., 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.
- Dronkers, J. J. (1964) – *Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters*. North Holland Publishing, Amsterdam.
- Fortunato, A. B. e Oliveira, A., 2005. Influence of intertidal flats on tidal asymmetry. *Journal of Coastal Research*, 21(5), 1062–1067.
- Fortunato, A.B., Oliveira, A. & Baptista, A.M. (1999) – On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologica Acta*, 22(1): 31-44.
- Fortunato, A.B. e Oliveira, A., 2000. On the representation of bathymetry by unstructured grids. *Computational Methods in Water Resources XIII*, Vol. 2, 889-896, L.R. Bentley et al (Eds.), Balkema.
- Fortunato, A.B., Rodrigues, M., Dias, J.M., Lopes, C. & Oliveira, A. (2013) – Generating inundation maps for a coastal lagoon: a case study in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ocean Engineering*, 64: 60-71.
- Freire, P. (2003) – *Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas. Estuário do Tejo, Portugal*. 380p., Tese de Doutoramento em Geologia, Especialidade Geologia Económica e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa, Portugal.
- Hagedoorn, J.M., Wolf, D. e Martinec, Z., 2007. An estimate of global mean sea-level rise inferred from tide-gauge measurements using glacial-isostatic models consistent with the relative sea-level record, *Pure and Applied Geophysics*, 164, 791–818.
- Miranda, L.B., Castro, B.M. & Kjerfve, B., 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. EdSUP, São Paulo, Brasil.
- Neves, F.S., 2010. *Dynamics and hydrology of the Tagus estuary: results from in situ observations*. Tese de doutoramento, Ciências Geofísicas e da Geoinformação (Oceanografia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa, Portugal, 210pp.
- Rahmstorf, S., 2010. A new view on sea level rise. *Nature reports Climate Change*, Vol. 4, 44 – 45, Macmillan Publishers Limited.



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

- Rilo, A.R., Freire, P., Mendes, R.N., Ceia, R., Catalão, J., Taborda, R., Melo, R., Andrade, C., Caçador, M.I. e Freitas, M.C., 2012. Um contributo para o traçado da Linha da Máxima Preia-mar de Águas Vivas Equinociais em ambientes de transição. O caso do estuário do Tejo. *11º Congresso da Água*, 11p., CD-ROM.
- Silva, T.A., Freitas, M.C., Andrade, C., Taborda, R., Freire, P. e Schmidt, S., 2013. Geomorphological response of salt-marshes in the Tagus estuary to sea level rise. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65 (em impressão).
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (eds.), 2007. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Vargas, C., Oliveira, F.S.B.F., Oliveira, A. e Charneca, N., 2008. Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: aplicação à restinga do Alfeite (Estuário do Tejo). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 8 (1): 25-43.
- Zhang, Y. e Baptista, A.M., 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modeling*, 21 (3-4): 71-96.