

Suscetibilidade à inundação de margens estuarinas. Aplicação à baía do Seixal (estuário do Tejo, Portugal)

A. Rilo⁽¹⁾, A. Fortunato⁽¹⁾, P. Freire⁽¹⁾, K. Li⁽¹⁾ e A. Tavares⁽²⁾

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). arilo@lnecc.pt

(2) Centro de Estudos Sociais, Universidade de Coimbra (CES-UC).

Resumo: As áreas marginais estuarinas são, normalmente, densamente povoadas, possuindo atividades com elevado valor económico e concentração de infraestruturas críticas. Os processos de inundação nestas áreas devem-se à conjugação de fatores como caudais fluviais, maré e eventos de sobrelevação meteorológica. A previsível subida do nível médio do mar (NMM) e o aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos são fatores relevantes na gestão destas zonas e que devem ser considerados na definição de medidas de gestão, tal como definido na Diretiva Europeia de Inundações. Este trabalho avalia a suscetibilidade à inundação da baía do Seixal, para diferentes períodos de retorno e para um cenário extremo de subida do NMM. Os níveis de água foram obtidos através de modelação hidrodinâmica e implantados num Modelo Digital de Elevação com a informação relativa ao uso do solo. Os resultados permitiram determinar a extensão das áreas potencialmente inundadas por classe de uso do solo.

Palavras-chave: estuários, nível médio do mar, sobrelevação meteorológica, áreas inundáveis, uso do solo.

1. INTRODUÇÃO

De forma geral as zonas marginais a estuários possuem baixa altitude, sendo densamente povoadas, e possuindo grande diversidade de usos com elevado valor socioeconómico. Nestas áreas o processo de inundação ocorre devido à conjugação de vários fatores, nomeadamente, níveis de maré elevados, caudais fluviais extremos e eventos de sobrelevação meteorológica. Por outro lado previsões genericamente aceites (Solomon *et al.*, 2007) apontam para a subida do nível médio do mar (NMM). De uma forma geral é apontada uma tendência para o aumento da frequência de eventos extremos, nomeadamente fenómenos de sobrelevação meteorológica muito embora Ribeiro *et al.* (2012) tenha mostrado uma tendência de diminuição no caso da costa portuguesa, indicando que as tempestades tenderão a deslocar-se para norte.

Portugal encontra-se atualmente vinculado ao cumprimento da Diretiva Europeia de Inundações que prevê que os estados membros desenvolvam cartografia de risco de inundação e diretrizes de gestão para os sistemas ribeirinhos e costeiros de cada país. Assim, torna-se relevante conhecer a suscetibilidade à inundação das áreas marginais estuarinas. O presente trabalho avalia a suscetibilidade à inundação da baía do Seixal considerando dois períodos de retorno diferentes (20 e 100 anos) para os fatores forçadores maré e sobrelevação meteorológica e ainda um cenário de subida do NMM.

2. ZONA DE ESTUDO

2.1 O estuário do Tejo

O estuário localiza-se na costa ocidental portuguesa desenvolvendo-se desde a embocadura até cerca de 50 km, limite montante da intrusão salina (Figura 1).



Figura 1. Enquadramento da baía do Seixal no estuário do Tejo

Do ponto de vista morfológico possui uma área de cerca de 34×10^3 ha dos quais cerca de 43% são áreas intertidais (Nogueira Mendes *et al.*, 2012). Estas áreas localizadas no sector interior do estuário são pouco profundas e fundamentalmente ocupadas por rastos de maré e sapais. O sector interior encontra-se ligado ao oceano atlântico através de uma canal de embocadura estreito e profundo cujas cotas atingem os 34 m (ZH).

Do ponto de vista hidrodinâmico, o estuário possui uma maré semidiurna e pode ser classificado como um estuário mesotidal, sendo que a amplitude de maré possui uma variação entre 0,75m, em Cascais em maré morta, e 4,3m, a montante em maré viva devido à amplificação das constituintes semidiurnas por efeito de ressonância (Fortunato *et al.*, 1999). O estreito canal de embocadura impede a propagação

de ondas oceânicas para o interior do estuário (Freire, 2003). No entanto, a extensão e orientação da área interna do estuário aos ventos dominantes (quadrantes NE - NW) proporcionam condições para a geração local de ondas (Freire e Andrade, 1999). O principal afluente ao estuário é o rio Tejo cujo caudal fluvial médio em Almourol é de 310 m³/s (Rilo *et al.*, 2014).

Nas margens do estuário do Tejo desenvolve-se a na região de Lisboa onde reside 26,7% da população do país (INE, 2012).

2.2 A baía do Seixal

A baía do Seixal localiza-se na margem sul do estuário do Tejo (Figura 1) e desenvolve-se numa área com cerca de 482 ha (Freire, 2003). A baía é abrigada pela restinga do Alfeite e comunica com o estuário através do canal do Seixal, sendo o rio Judeu o afluente fluvial mais importante que desagua na baía. No seu interior desenvolve-se uma importante área de sapal (sapal de Corroios) e raso de maré. A baía é enquadrada pelo concelho do Seixal, que segundo dados recentes (INE, 2012) registou um crescimento populacional de 5,3%. A área marginal da baía é ocupada por áreas urbanas e industriais, sendo igualmente importante a área natural correspondente à restinga do Alfeite.

3. METODOLOGIA

3.1. Modelação numérica dos níveis extremos e cenário de subida do nível médio do mar

Os níveis extremos no estuário do Tejo foram determinados através de uma análise estatística dos dados do marégrafo de Cascais, seguida da aplicação de um modelo hidrodinâmico. A metodologia está descrita em detalhe em Fortunato *et al.* (2013), e uma aplicação preliminar ao estuário do Tejo é apresentada em Guerreiro *et al.* (2013). Selecionaram-se inicialmente os registos anuais completos de dados de níveis do marégrafo de Cascais. Os residuais, definidos como a diferença entre as observações e a síntese harmónica de maré, foram depois calculados para cada um desses anos (24 anos, neste caso). Geraram-se depois séries anuais de níveis, sintéticas, somando a maré aos residuais obtidos atrás. Para tal, fez-se variar:

- A maré astronómica para um conjunto de 19 anos consecutivos. Desta forma, teve-se em consideração o ciclo de variabilidade da maré, de cerca de 18,7 anos;

- Os residuos, com defasagens variáveis relativamente à maré. Estas defasagens 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.

Uma análise estatística das 328320 (i.e. 24x19x30x24) séries hipotéticas anuais assim

obtidas permitiu determinar os níveis associados a diferentes períodos de retorno e as séries temporais correspondentes. Finalmente, estas séries foram usadas para forçar um modelo hidrodinâmico do estuário.

A propagação da maré e das sobrelevações foi simulada com o modelo SELFE (Zhang e Baptista, 2008). A malha de cálculo cobre todo o estuário até à Linha da Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais (LMPMAVE) e, em zonas seleccionadas, estende-se até à cota 5 (m, NMM) com uma resolução da ordem dos 30 m. O modelo foi devidamente calibrado, obtendo-se excelentes resultados (Guerreiro *et al.*, 2013). O cenário de subida do NMM considerado foi de 1,5m e baseou-se em análise bibliográfica (e.g. Solomon *et al.*, 2007; Rahmstorf, 2010) correspondendo ao valor central de várias estimativas publicadas. Os níveis máximos obtidos para os diferentes períodos de retorno e subida do NMM foram extraídos dos resultados do modelo e transpostos para nível médio (considerado 2,08 m acima do ZH).

3.2. Situação de referência

A situação de referência a partir da qual se avaliou a suscetibilidade à inundaçao na área de estudo foi a Linha da Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais (LMPMAVE), correspondente ao limite entre leito e margem segundo a Lei 54/2005 de 15 de novembro. A LMPMAVE foi vetorizada sobre os ortofotomapas de 2007 (com 0,5 m de resolução espacial) da Direção Geral do Território (DGT), e a metodologia e critérios do seu traçado encontram-se descritos em Rilo *et al.* (2014).

A área terrestre considerada para avaliar a suscetibilidade foi a orla estuarina (Figura 1) que se encontra definida no decreto-lei 129/2008 de 21 de Julho como: “*corresponde a uma zona terrestre de proteção cuja largura é fixada (...) até ao máximo de 500 m contados a partir da margem (...)*”, sendo a margem a faixa de terreno contígua ao leito e cuja largura na área de estudo é de 50 m. Assim, neste trabalho avaliou-se a suscetibilidade à inundaçao de uma faixa terrestre de 550 m para o interior da LMPMAVE.

3.3. Modelo digital de elevação e cartografia de uso do solo

O Modelo Digital de Elevação (MDE) da zona de estudo foi extraído do MDE das Zonas Costeiras de Portugal continental cedido pela DGT com uma grelha de 2 m obtida por correção de pares estereoscópicos de fotografia aérea digital de 2008.

A cartografia de uso do solo utilizada baseou-se nos ortofotomapas de 2007 (com 0,5 m de resolução espacial) da DGT, adotando uma simplificação da classificação do Corine Land Cover, segundo Freire *et al.* (2012), tendo sido cartografadas as áreas de

ocupação com base nas características detetadas à escala 1.10 000.

3.4. Extração das áreas suscetíveis à inundação

No sentido de avaliar a suscetibilidade à inundação foram considerados três cenários distintos: 1) período de retorno do forçamento (maré e sobrelevação) de 20 anos; período de retorno do forçamento de 100 anos; período de retorno do forçamento de 100 anos com subida do NMM de 1,5 m.

Numa primeira fase foi criado o mosaico do MDE para a área de estudo. Os níveis máximos extraídos do modelo para cada cenário foram importados para o *software* ArcGIS e cruzados com o MDE de modo a obter a cota do terreno correspondente. Posteriormente foi calculada a diferença entre o nível máximo e a cota do terreno (altura da coluna de água). Foi criado um TIN (*Triangulated Irregular Network*) das alturas da coluna de água e extraída a linha de valor igual a zero. Esta linha corresponderá ao limite da área inundada.

Este limite foi sobreposto à cartografia de uso do solo da orla estuarina (área total na zona de estudo de 7,8km²). Posteriormente foram extraídos os valores de área potencialmente inundada por classe de uso do solo e transformados em percentagens relativas aos 7,8 km² de área.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostram a suscetibilidade à inundação na baía do Seixal e apontam para que 8,8% da área marginal à baía do Seixal possa ficar inundada quando se considera um cenário com período de retorno de 20 anos e que 9,9% será potencialmente inundada considerando um cenário de 100 anos. Num cenário com período de retorno de 100 anos e subida do NMM a percentagem de área potencialmente inundada sobe para 20,5% (Figura 2).

Em termos de classes de ocupação e considerando o cenário com período de retorno de 100 anos os espaços naturais e urbanos serão os mais afetados com 8% e 1,2% de área inundada. No entanto, os resultados para o mesmo cenário com subida do NMM mostram que a percentagem de área urbana potencialmente inundada sobe para 5,2%, e a relativa aos espaços industriais de 0,4% para 1,4% e espaços verdes de 0,3% para 2,8%.

A restinga do Alfeite, ocupa grande parte da classe de uso “espaço natural” e fica potencialmente inundada nos dois cenários que não consideram a subida do NMM embora permaneçam pequenas zonas emersas (Figura 2a). No cenário com subida do NMM a restinga fica completamente inundada (Figura 2b).

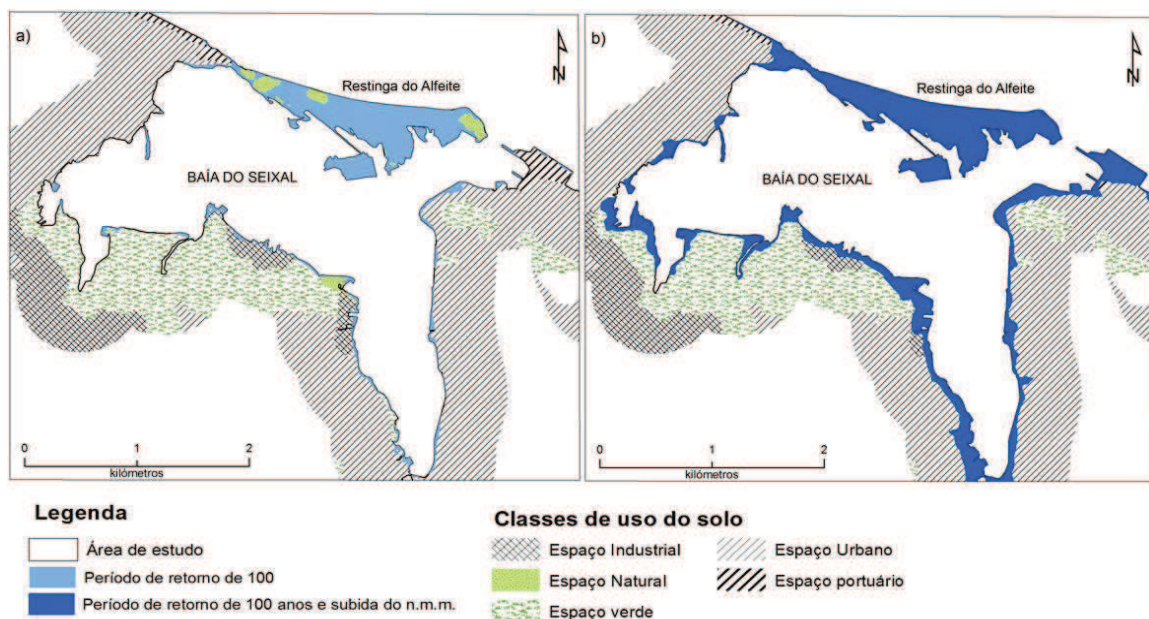


Figura 2. Cartografia de suscetibilidade à inundação na baía do Seixal para o cenário com período de retorno de 100 anos (a) e para o cenário correspondente a um período de retorno de 100 anos com subida do NMM (b).

Este resultado vai ao encontro do apresentado por Vargas *et al.*, 2008, para a mesma zona de estudo.

Os resultados apontam ainda para que não haja diferenças significativas nos níveis máximos obtidos para os cenários com período de retorno de 20 e 100 anos, sendo este comportamento consistente com o observado por Fortunato *et al.*, 2013 para a Ria de Aveiro. Este facto mostra o papel preponderante da

subida do NMM na suscetibilidade à inundação das margens do estuário do Tejo.

Este trabalho mostra a importância de considerar cenários de subida do NMM na produção de cartografia de suscetibilidade e vulnerabilidade à inundação, muito especialmente em sistemas estuarinos cujo forçamento e características hidrodinâmicas são significativamente diferentes das

consideradas em sistemas fluviais. Por outro lado, uma parte significativa das margens do estuário são espaços urbanos pelo que futuras metodologias de abordagem deverão ter em conta os efeitos de níveis elevados nos sistemas de drenagem urbana.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho aborda a suscetibilidade à inundação da área marginal da baía do Seixal (estuário do Tejo) considerando dois cenários com períodos de retorno associados ao forçamento (maré e sobrelevação meteorológica) de 20 e 100 anos e um cenário de subida do NMM.

Os resultados mostram que cerca de 9,9% da área orla estuarina na área de estudo será afetada para um cenário com período de retorno dos forçamentos de 100 anos e que 20,5 % da orla é suscetível à inundação quando se considera o mesmo cenário com subida do NMM.

Os resultados mostram ainda que não são significativas as diferenças entre os cenários que consideram os períodos de retorno de 20 e 100 anos, enfatizando a relevância do efeito da subida do NMM na suscetibilidade à inundação nas margens do estuário do Tejo.

Agradecimentos

Este trabalho foi um contributo para o projeto Molines (PTDC/AAG/MAA/2811/2012), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Os autores agradecem à Direção Geral do Território a cedência da informação altimétrica e à Câmara Municipal do Seixal pela cedência de batimetria da baía do Seixal.

REFERÊNCIAS

- Freire, P. (2003). Evolução morfo-sedimentar das margens estuarinas. Estuário do Tejo, Portugal. 380 p., LNEC, Lisboa, Portugal.
- Freire, P.; Andrade, C. (1999). Wind-induced sand transport in Tagus estuarine beaches. First results. *Aquatic Ecology*, 33(3):225-233.
- Freire, P.; Rilo, A.R.; Ceia, R.; Mendes, R.N.; Catalão, J.; Taborda, R.; Melo, R. (2012). Tipificação das zonas marginais estuarinas. O caso do estuário do Tejo. *2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal, 319-322.
- Fortunato, A.B.; Oliveira, A.; Batista, A.M. (1999). On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologia Acta*, 22(1):31-44.
- Fortunato, A.B., M. Rodrigues, J. M. Dias, C. Lopes, A. Oliveira. (2013). Generating inundation maps for a coastal lagoon: A case study in the Ria de Aveiro (Portugal), *Ocean Engineering*, 64:60-71.
- Guerreiro M., Fortunato A.B., Freire P., Rilo A., Taborda R., Freitas M.C., Andrade C., Silva T., Rodrigues M. (2013). Impacte da subida do nível médio do mar na inundação marginal no estuário do Tejo. *Atas do VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa* (Maputo, Moçambique), 19pp.
- Instituto Nacional de Estatística (2012). *Censos 2011 – resultados definitivos – Região de Lisboa*. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, Portugal, 320 p
- Mendes, R. Nogueira; Ceia, R.; Silva, T.; Rilo, A.; Guerreiro, M.; Catalão, J.; Taborda, R.; Freitas, M.C.; Andrade, C.; Melo, R.; Fortunato, A.B.; Freire, P. (2012). Detecção remota e cartografia do intertidal. O contributo do projeto MORFEED, *2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal, 341-344.
- Rahmstorf, S., (2010). A new view on sea level rise. *Nature reports Climate Change*, 4:44-45, Macmillan Publishers Limited.
- Ribeiro, N.A., Fortunato, a.B., e Rocha, A.C. (2012). Efeito das alterações climáticas no regime de agitação marítima no Atlântico Norte e costa portuguesa. *2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal, 163-166.
- Rilo, A.; Freire, P.; Nogueira Mendes, R.; Ceia, R.; Catalão, J.; Taborda, R.; Melo, R.; Caçador, M. C.; Freitas, M.C.; Fortunato, A.; Alves, A. (2014). Metodologia para o traçado da Linha de Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais em ambientes de transição: aplicação ao estuário do Tejo (Portugal). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 14 (1):95-107.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. 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.