

MODELAÇÃO DA INUNDAÇÃO EM ESTUÁRIOS. DA AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE À GESTÃO CRÍTICA

Paula FREIRE¹; Alexandre O. TAVARES²; André B. FORTUNATO³; Luís SÁ⁴; Anabela OLIVEIRA⁵; Ana RILO⁶; Pedro P. SANTOS⁷; João L. GOMES⁸

RESUMO

O desenvolvimento de estratégias de gestão do risco de inundação em zonas costeiras requer o suporte de ferramentas validadas de previsão da perigosidade e de avaliação do risco. As margens estuarinas são zonas costeiras particularmente expostas ao perigo de inundação que resulta da conjugação de diferentes fatores, apresentando níveis elevados de risco devido à intensidade e tipo de ocupação territorial. Apresentam-se resultados do projeto MOLINES que visa a melhoria do conhecimento dos processos de inundação em margens estuarinas e a definição de estratégias de avaliação e de gestão do risco de inundação. O projeto segue uma abordagem metodológica inovadora considerando duas escalas de análise distintas, escala do estuário e escala local. O estuário do Tejo foi escolhido como caso de aplicação, e a avaliação das ocorrências históricas de inundação à escala do estuário possibilitou a caracterização do processo de inundação incluindo a identificação das diferentes componentes de perigo. Através da modelação numérica da hidrodinâmica do estuário, para diferentes cenários climáticos, construíram-se mapas de perigosidade representativos da extensão e profundidade da inundação. À escala local, a expressão espacial da perigosidade foi avaliada através de um índice baseado na profundidade e velocidade do escoamento. A avaliação da vulnerabilidade territorial focou as diferentes escalas de atuação, cujos resultados à escala local foram cruzados com a análise dos elementos expostos à inundação, considerando o potencial para a perda direta e indireta. Os resultados definem as zonas de maior risco à escala local cuja avaliação possibilita o suporte de orientações para a gestão do risco, incluindo ações de mitigação, e de comunicação e alerta. Estes resultados foram integrados numa plataforma *WebSIG* que

¹ Geóloga, Doutora em Geologia Económica e do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, pfreire@lnec.pt

² Eng.º Geólogo, Doutor em Engenharia Geológica, ramo de Geologia do Ambiente e Ordenamento, Departamento de Ciências da Terra e Centro de Estudos Sociais da Universidade de Coimbra, Largo D. Dinis, Colégio de S. Jerónimo, 3000-995 Coimbra, atavares@ci.uc.pt

³ Eng.º Civil, Doutor em Engenharia do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, afortunato@lnec.pt

⁴ Eng.º do Ambiente, Mestre em Engenharia Sanitária, Autoridade Nacional de Proteção Civil, Av. do Forte em Carnaxide, 2794 - 112 Carnaxide, luis.sa@prociiv.pt

⁵ Eng.ª Civil, Doutora em Engenharia do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, aoliveira@lnec.pt

⁶ Geóloga, Doutoranda em Território, Risco e Políticas Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, arilo@lnec.pt

⁷ Geógrafo, Doutorando em Território, Risco e Políticas Públicas, Centro de Estudos Sociais da Universidade de Coimbra, Largo D. Dinis, Colégio de S. Jerónimo, 3000-995 Coimbra, pedrosantos@ces.uc.pt

⁸ Engenheiro Informático, Mestre em Engenharia Informática, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, jlgoes@lnec.pt

visa suportar um sistema de alerta, fazer a interface com os sistemas de previsão e de monitorização em tempo real, e, ainda, a interface de análise de risco.

Palavras-chave: gestão do risco de inundação, vulnerabilidade territorial, estuário do Tejo, subida do nível médio do mar, plataforma *WebSIG*, sistema de alerta

1. INTRODUÇÃO

As áreas costeiras em geral e em particular as zonas de transição, como os estuários, estão sujeitas a intensa pressão antrópica apresentando risco elevado à inundação (Morris *et al.*, 2013), como demonstrado pelo impacto dramático da tempestade Xynthia (2010) na costa Francesa (Bertin *et al.*, 2014) e da tempestade Sandy (2012) em Nova Iorque (Aerts *et al.*, 2013). A complexidade da gestão do risco de inundação nestes sistemas está associada desde logo à multiplicidade dos fatores que contribuem para o perigo (e. g. níveis de maré, caudais fluviais, sobrelevação meteorológica, vento), com diferentes escalas espaciais e temporais de ocorrência, o que exige ferramentas de previsão integradas e validadas (Cluckie *et al.*, 2000). A intensa ocupação antrópica aliada aos impactos das alterações climáticas, como a subida do nível médio do mar e o possível aumento da frequência de tempestades (IPCC, 2013), coloca novos desafios à gestão do risco de inundação destas zonas que devem ser acautelados no presente.

O recentemente aprovado Quadro de Ação Global de Sendai para a Redução dos Desastres (UNISDR, 2015) apela a que as decisões de gestão do risco tenham por base o conhecimento sobre perigos, vulnerabilidade e exposição de pessoas e bens e que essa informação deva ser usada na avaliação do risco pré-desastre, na prevenção e mitigação bem como na implementação de respostas adequadas. No mesmo sentido se enquadra a Diretiva Europeia 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão do risco de inundação, transposta para ordem jurídica interna através do Decreto-Lei nº115/2010, de 22 de Outubro. A Diretiva tem a intenção de transmitir orientações aos estados membros sobre o planeamento da gestão do risco daqueles fenómenos, vinculando-os ao compromisso da elaboração de cartas de zonas inundáveis, de risco de inundação e planos de gestão do risco de inundação, devendo estes últimos centrar-se na prevenção, proteção e preparação. Neste contexto, urge o desenvolvimento de metodologias que visem a avaliação e caracterização adequadas dos processos de inundação e da vulnerabilidade territorial em margens estuarinas, de modo a suportar uma análise integrada do risco e o desenvolvimento de medidas de gestão.

O presente trabalho tem como objetivo a apresentação de resultados do projeto MOLINES, no qual se desenvolveu uma metodologia de apoio à gestão do risco de inundação em estuários. Este artigo inicia-se pela apresentação da abordagem conceptual e da área de estudo, seguindo-se a apresentação da avaliação preliminar que inclui a análise do histórico de ocorrências de perdas por inundação e a caracterização dos principais eventos. Segue-se a apresentação das componentes de avaliação do risco, designadamente a aplicação de um modelo numérico de inundação, a caracterização da perigosidade, a análise territorial e a avaliação da vulnerabilidade. A análise da exposição e impactos é apresentada no ponto 5, seguida da plataforma *WebSIG* e sistema de aviso e alerta. Por fim, referem-se as principais conclusões e trabalho futuro.

2. ABORDAGEM CONCEPTUAL E ÁREA DE ESTUDO

Tomando como referência o modelo de governação e gestão do risco do *International Risk Government Council* (IRGC, 2005) foi construída uma abordagem conceptual (Figura 1) que toma como ponto de partida duas escalas espaciais de análise, a escala do estuário e a escala local, e centra-se numa visão integrada de todas as fases da gestão do risco. Embora o modelo conceptual desenvolvido no âmbito do projeto MOLINES seja mais abrangente, incluindo o apoio ao desenvolvimento de medidas de adaptação e de mitigação, no presente estudo apresenta-se uma abordagem focada no *WebSIG* e sistema de aviso e alerta.

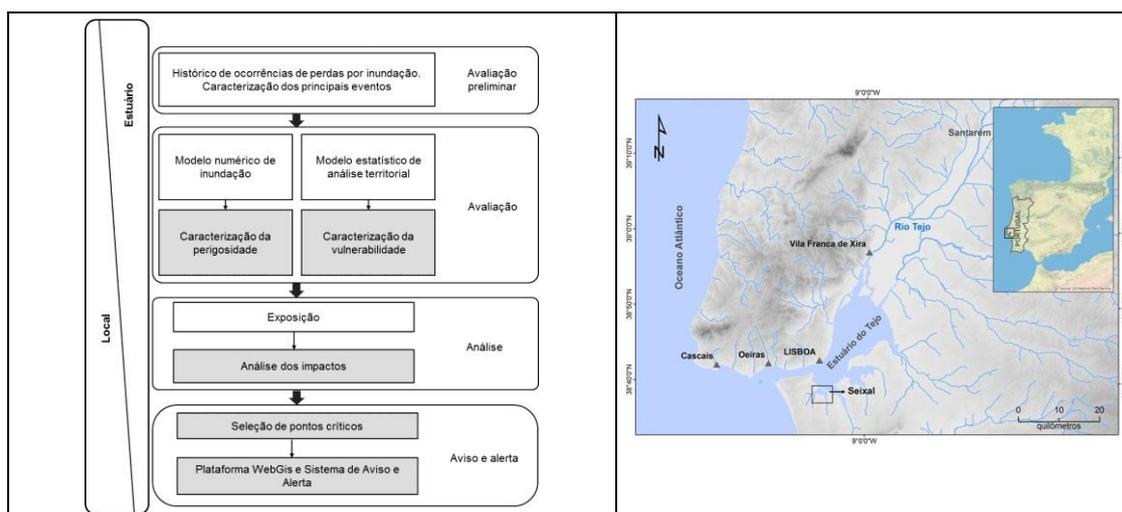


Figura 1. Abordagem conceptual de apoio à gestão integrada do risco de inundação em estuários (à esquerda). Enquadramento geográfico do estuário do Tejo. O retângulo representa a área de estudo à escala local, frente estuarina do Seixal (à direita).

A abordagem inicia-se com a avaliação preliminar do risco, estabelecida pela análise histórica de ocorrências e eventos de inundação. Neste trabalho considera-se como ocorrência um local definido geograficamente que é afetado por inundação estuarina independentemente da sua severidade, e que é descrito em fontes de informação selecionadas (Santos *et al.*, 2014). Por sua vez, um evento será constituído por uma ou mais ocorrências compreendidas no intervalo de tempo correspondente à ação do mesmo fator de perigo (por exemplo uma tempestade). A informação recolhida nesta fase permite o conhecimento alargado do tipo de impactos provocados por episódios históricos de inundação bem como a identificação e caracterização dos fatores desencadeantes. A fase de avaliação tem como objetivo a caracterização e avaliação da perigosidade e da vulnerabilidade territorial atual do sistema estuarino em estudo. Permite obter um retrato global do risco de inundação no estuário e selecionar uma área à escala local relevante para a aplicação da análise do risco. Na fase de análise do risco, a exposição e impactos da inundação na área escolhida são avaliados de modo a fornecer a informação relevante para a seleção dos pontos críticos que integram o sistema de aviso e alerta. Assumiu-se que as dinâmicas atuais de ocupação do território se mantêm num cenário de contenção de evolução antrópica. A abordagem culmina com a caracterização e desenho da plataforma *WebSIG* e sistema de aviso e alerta para apoio à gestão do risco de inundação.

A visão conceptual apresentada foi aplicada ao estuário do Tejo (Figura 1), que enquadra a maior área metropolitana do país e onde se faz sentir uma grande pressão demográfica, industrial e agrícola, apresentando a região de Lisboa um valor de densidade populacional (940 habitantes por km²) muito superior à média nacional (114,6 habitantes por km²) (INE,2012). Do ponto de vista da ocupação das suas zonas marginais, são relevantes as áreas urbanas (34% da orla estuarina), agrícolas (45%) que se situam essencialmente na zona montante e as áreas industriais na margem sul (Freire *et al.*, 2012). Salienta-se também a presença de diversas infraestruturas críticas com importância social e económica (p.e. base aérea do Montijo, instalações portuárias e industriais, vias de transporte marítimo, ferroviário e rodoviário). Cerca de 43 % da área estuarina é ocupada por domínio intertidal (Nogueira Mendes *et al.*, 2012) da qual fazem parte habitats diversos (sapais, rasos de maré, praias, ostras e ervas marinhas), cuja relevância biológica e paisagística justificou a classificação da Reserva Natural do Estuário do Tejo.

As características hidrodinâmicas do estuário e a distribuição dos níveis extremos no seu interior são diretamente influenciadas pelo contraste morfológico existente entre a zona interior extensa e pouco profunda e o canal de embocadura estreito e profundo (Figura 1). Os níveis de maré são forçados por um regime semidiurno, cujas amplitudes variam entre 0,75m em Cascais (em maré morta) e 4,3 m na área montante do estuário, devido ao efeito de ressonância que amplifica as constituintes de maré semidiurnas (Fortunato *et al.*, 1999). Embora a propagação das ondas oceânicas no interior do estuário seja limitada pelo canal de embocadura, a extensão e orientação relativa aos ventos dominantes (N e NW) da zona interior favorece a geração local de ondas (Freire e Andrade, 1999). A influência nos níveis estuarinos do caudal do rio Tejo, o principal afluente do estuário (caudal médio de 368 m³/s, seg. Neves, 2010), faz-se sentir apenas até cerca de 40 km a montante da embocadura (Vargas *et al.*, 2008; Guerreiro *et al.*, 2015). Para jusante, o forçamento dos níveis extremos deve-se sobretudo ao efeito da maré e sobrelevação meteorológica (Guerreiro *et al.*, 2015).

3. AVALIAÇÃO PRELIMINAR

3.1. Histórico de ocorrências de perdas por inundação

A avaliação preliminar iniciou-se com o levantamento e sistematização do histórico de ocorrências de perdas por inundação no estuário do Tejo através da construção de uma base de dados geográfica. A abrangência geográfica da base de dados compreende a área do estuário, entre os municípios de Oeiras e Almada a jusante e Vila Franca de Xira a montante, que corresponde a 11 municípios. Para garantir que as ocorrências a incluir na base de dados correspondessem a inundações estuarinas – ou que a influência dos níveis no estuário se associasse às mesmas – foram incluídas apenas aquelas situadas entre a Linha da Máxima Preia-Mar de Água Vivas Equinociais (LMPMAVE), definida em Rilo *et al.* (2014), e a cota dos 20 m. Dada a importância nacional da área metropolitana de Lisboa na base de dados foram consideradas apenas fontes de informação de âmbito nacional e de instituições nacionais, designadamente jornais nacionais (147 jornais entre diários e semanais, com diferentes coberturas temporais), a Base de Dados de Ocorrências da Autoridade Nacional de Proteção Civil e fotografias de arquivo cedidas pelo Porto de Lisboa. A maioria dos jornais consultados foram previamente selecionados no âmbito do projeto DISASTER, no qual se analisou o registo de eventos hidrogeomorfológicos relatados nos

jornais nacionais entre 1864 e 2008. Esta informação foi complementada no âmbito do presente trabalho.

A base de dados é composta por quatro grandes grupos de informação: a) dados de identificação da ocorrência, data, local e fonte; b) Impactos físicos e sociais; c) caracterização da inundação, descrição, altura, profundidade; c) fatores desencadeantes de natureza hidrológica, meteorológica e de drenagem urbana. No sentido de garantir a coerência da informação recolhida, a base de dados foi preenchida por uma única pessoa, que consultou cada uma das fontes. Quando o mesmo evento foi reportado em mais do que uma fonte, toda a informação foi recolhida e comparada no sentido de refinar o preenchimento da base de dados. Não foram incluídos registos cuja fonte fosse considerada vaga ou fornecesse pouca informação sobre os danos e processo de inundação. A base de dados construída abrange o período entre 1865 e 2013, tendo sido registadas 232 ocorrências agrupadas em 44 eventos. A distribuição temporal (Figura 2) mostra que o período entre 1937 e 1945 foi o que registou um maior número de ocorrências. Relativamente à distribuição espacial, mais de metade das ocorrências correspondem ao concelho de Lisboa (53%), em que Vila Franca de Xira (18%) e Oeiras (13%) apresentam valores superiores a 10%. O número máximo de eventos registados num ano foi de 3 (em 1936 e 2010) sendo que a probabilidade de ocorrer um ou mais eventos num ano é de 26%.

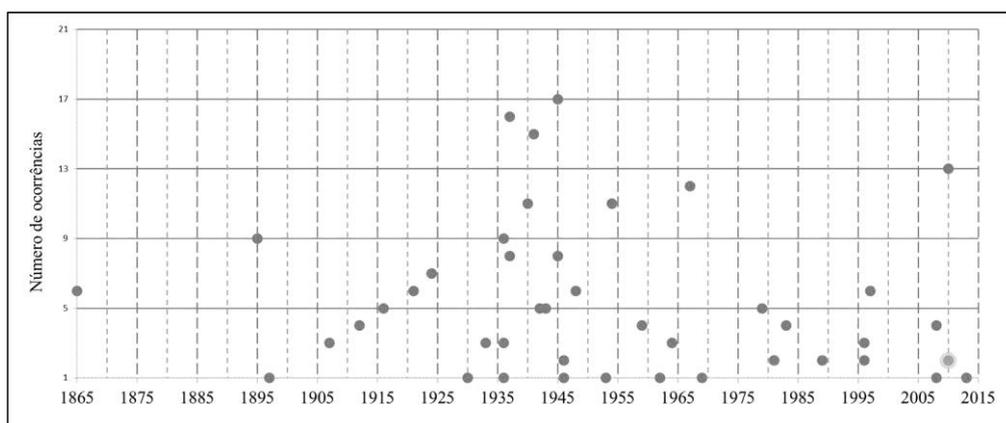


Figura 2. Distribuição temporal das ocorrências de inundação. Cada círculo corresponde a um evento.

3.2. Caracterização dos principais eventos

Da análise dos eventos históricos de inundação registados na base de dados, sobressaem dois pela sua incidência espacial e impactos associados: a tempestade de 15 de fevereiro de 1941, que corresponde ao evento registado com maior número de mortes, e 27 de fevereiro de 2010 que é o evento mais recente com maior número de ocorrências associadas (Figura 2).

A tempestade de 15 de fevereiro de 1941 teve efeitos devastadores em toda a costa portuguesa, sendo considerada por Muir-Wood (2011) como a maior catástrofe ocorrida na Península Ibérica nos últimos 200 anos. O evento de inundação associado a esta tempestade teve uma vasta incidência espacial entre Cascais e Vila Franca de Xira, tendo sido registadas como perdas humanas 28 mortos, 14 feridos, 125 evacuados e 3 desalojados. As perdas materiais incluem danos em embarcações e estruturas portuárias, casas particulares e estabelecimentos comerciais, a destruição de sementeiras e perda de gado, e ainda a interrupção da circulação marítima, rodoviária e ferroviária. O evento de 27

de fevereiro 2010 corresponde à passagem da tempestade *Xynthia* pela costa portuguesa (Bertin *et al.*, 2014). No estuário do Tejo, os efeitos deste evento fizeram-se sentir ao longo das duas margens entre Oeiras e Vila Franca de Xira, e embora não estejam associadas à inundações perdas humanas, houve elevados danos materiais na frente estuarina, incluindo a destruição de infraestruturas portuárias, muros, passeios e mobiliário urbano. A frente estuarina do centro histórico do Seixal (Figura 2) foi um dos locais especialmente afetado onde a inundações afetou casas particulares e estabelecimentos comerciais e provocou a interrupção da circulação em vias públicas.

Estes eventos tiveram características muito semelhantes (Breilh *et al.*, 2014), e a análise de dados oceanográficos e meteorológicos (níveis de maré, pressão atmosférica, vento, precipitação) e de caudal do rio Tejo mostra que em ambos os eventos os níveis de inundações no estuário resultaram da conjugação de situações de maré viva e de sobrelevação de origem meteorológica (superior a 0,55 m), e também da ocorrência de vento com intensidade muito elevada (superior a 100 km/h).

4. AVALIAÇÃO DO RISCO

4.1. Modelo numérico de inundações

A extensão da inundações na zona de estudo em situações extremas foi determinada através da simulação numérica dos níveis no estuário do Tejo, utilizando o modelo de circulação e agitação marítima SCHISM-WWM. Este modelo permite simular simultaneamente os níveis e as velocidades devidas à maré, vento, pressão atmosférica e caudal fluvial, assim como a geração e propagação da agitação marítima. O modelo foi aplicado a um vasto domínio que se estende do rio Tejo, perto de Santarém, até 30 km a jusante da embocadura (Figura 1). O domínio de cálculo estende-se para além da LMPMAVE de forma a incluir as zonas potencialmente inundáveis em situações extremas. A validação do modelo é apresentada em detalhe em Guerreiro *et al.* (2015) e Fortunato *et al.* (2015).

Foram seguidas duas formas alternativas de definir as condições de forçamento do modelo. A primeira foi baseada na abordagem de Fortunato *et al.* (2013). Esta abordagem parte de uma análise estatística de dados de um marégrafo local (Cascais no caso presente, Figura 1) para determinar condições associadas a determinado período de retorno. Estas condições são depois utilizadas para forçar o modelo e determinar a extensão da inundações associada a esse período de retorno. A aplicação desta abordagem ao estuário do Tejo está descrita em Guerreiro *et al.* (2015). A abordagem alternativa baseia-se na análise de eventos históricos apresentada acima para definir os eventos mais gravosos. Esses eventos são depois simulados com o maior detalhe possível, mas para as condições atuais de batimetria e de nível médio do mar. Com base na análise descrita na secção anterior, selecionou-se a tempestade de fevereiro de 1941 como o evento potencialmente mais gravoso que terá acontecido na área de estudo nas últimas décadas. O modelo é pois forçado pela maré proveniente do modelo regional de Fortunato *et al.* (em revisão), ventos e pressão atmosférica da reanálise 20CR (Compo *et al.*, 2010), e agitação marítima de Bertin *et al.* (2013). Não havendo dados de caudal fluvial nessa altura, utilizaram-se os medidos durante a tempestade *Xynthia*, de fevereiro de 2010, que, como já referido, teve características muito semelhantes às de 1941 (Breilh *et al.*, 2014).

A primeira abordagem tem a vantagem de associar um período de retorno a cada mapa de inundação. É também bastante mais simples em termos de modelação, uma vez que não se simula a agitação marítima. Em compensação, a segunda abordagem é bastante mais rigorosa em termos de representação dos processos físicos, na medida em que representa todos os processos relevantes. Em particular, representa-se o efeito local da agitação marítima e do vento. No entanto, uma comparação dos resultados das duas abordagens mostra que estes são bastante semelhantes no caso do Tejo (Figura 3).

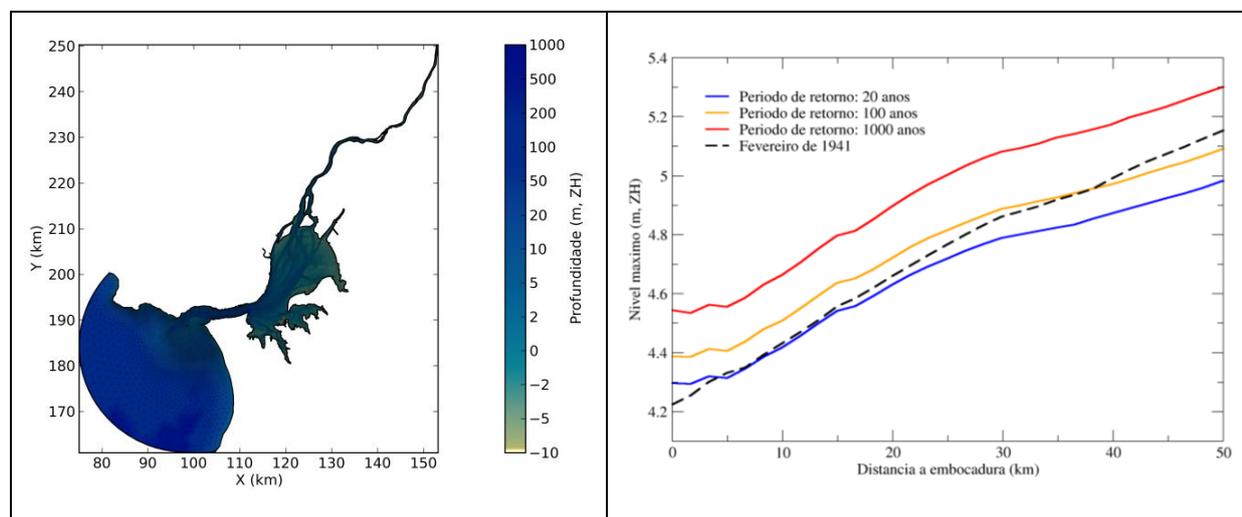


Figura 3. Modelação numérica da inundação. Esquerda: batimetria e malha de cálculo; direita: níveis extremos ao longo do eixo do estuário para as duas abordagens de modelação alternativas.

4.2. Caracterização da perigosidade

A caracterização da perigosidade à inundação foi efetuada a partir de simulações para diferentes períodos de retorno (20, 100 e 1000 anos), utilizando a abordagem simplificada descrita acima. Para cada período de retorno considerou-se ainda o cenário de subida do nível médio do mar RCP 8.5 do 5º Relatório do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC, 2013) correspondente a 1 m em 2100. Os níveis máximos obtidos no modelo foram cruzados com o modelo digital de terreno da Direção Geral do Território de 2008 para obter as alturas da coluna de água e extensão da inundação. Os resultados destas simulações foram ainda analisados por forma a determinar a perigosidade P (DEFRA/Environmental Agency, 2006):

$$P = H(v + 0.5)$$

onde H representa a profundidade total (m), v a velocidade média na vertical (m/s). O índice de perigosidade (I) é calculado em função de P segundo o Quadro 1.

A representação cartográfica das alturas da coluna de água e extensão da inundação, e do índice de perigosidade para o cenário correspondente ao período de retorno de 100 anos é apresentada na Figura 4.

Quadro 1. Índice de perigosidade (DEFRA/Environment Agency, 2006).

Perigosidade	$P < 0.75$	$0.75 < P \leq 1.25$	$1.25 < P \leq 2.5$	$P > 2.5$
Índice (I)	1	2	3	4

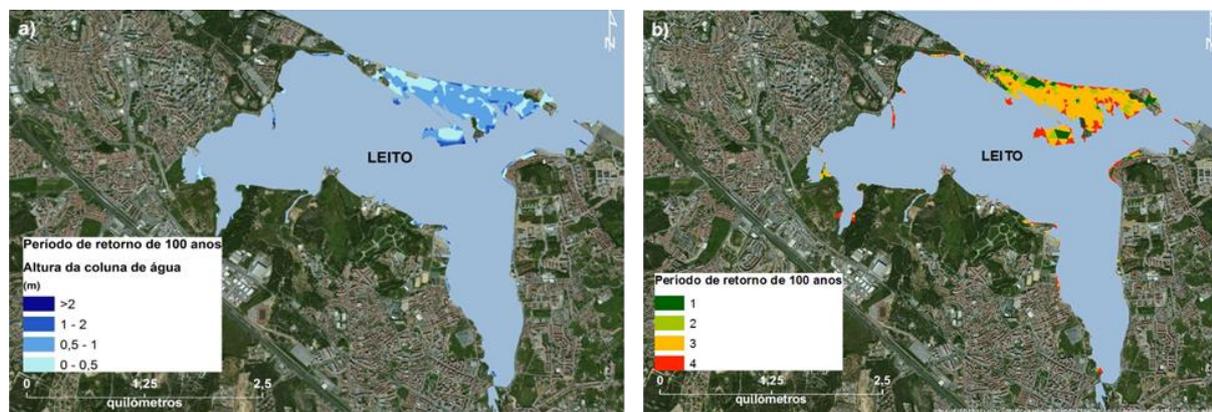


Figura 4. Resultados da perigosidade para um cenário correspondente ao período de retorno de 100 anos e subida do nível médio do mar: a) extensão e profundidade da inundação; b) índice de perigosidade.

4.3 Análise territorial e avaliação da vulnerabilidade

A avaliação da vulnerabilidade territorial no âmbito do projeto MOLINES assumiu o desafio de produzir informação a diferentes escalas de atuação (estuário e local), ao nível da gestão do risco. Partiu-se de uma análise estatística de variáveis que ressaltam a multidimensionalidade dos fatores que definem e explicam o território, incluindo aspetos como as características dos indivíduos (idade, habilitações, rendimentos, condições de alojamento e mobilidade, entre outras) e as características do meio envolvente em termos de elementos construídos sensíveis, estratégicos e vitais (escolas, estruturas residenciais para pessoas idosas, estações fluviais, quartéis de bombeiros e agentes de segurança, entre outras). A caracterização da vulnerabilidade faz ressaltar a heterogeneidade territorial, entre áreas fortemente urbanizadas – não exclusivamente com a finalidade de habitação – e áreas naturais, algumas delas protegidas, e permite identificar espaços mais adequados para o planeamento e operacionalização das ações de gestão do risco e de otimização do sistema de aviso e alerta.

A metodologia adotada baseia-se na proposta de Cutter *et al.* (2003) para a construção do Social Vulnerability Index (SoVI[®]). A sequência metodológica inicia-se com a seleção de um conjunto de variáveis representativas de distintas dimensões da vulnerabilidade, às quais, por análise de correlação e de comunalidades, se excluem as variáveis multicolineares, ou seja, redundantes na representação de uma mesma dimensão da vulnerabilidade. A partir de um conjunto inicial de dados de 126 variáveis obteve-se, por este processo, um total de 34 variáveis cujo valor de KMO (0,813) atesta a adequação do conjunto para a aplicação de Análise de Componentes Principais (ACP). A ACP permitiu identificar e agrupar as variáveis segundo diferentes dimensões de vulnerabilidade, assim como a quantificação e

classificação das unidades de análise em termos de maior ou menor vulnerabilidade para cada uma das componentes principais e para um valor compósito obtido pela soma algébrica dos respetivos valores (Tavares *et al.*, 2015). A ACP definiu oito componentes principais que explicam 71,9% da variância total e que, por ordem decrescente, são descritivas de contextos urbanos degradados (21,9%), contextos residenciais de famílias tradicionais (15,7%), contextos urbanos de elevada capacidade económica (10,5%), mobilidade da população (9,2%), e tipologia e densidade urbana (6,5%), áreas urbanas antigas com população envelhecida (4,2%), nível educacional da população (3,9%), densidade demográfica e de edifícios (3,2 %).

A Figura 5 ilustra o valor compósito de vulnerabilidade territorial obtido para o estuário do Tejo e para a faixa ribeirinha envolvente à Baía do Seixal, uma área de estudo local, para a qual se estuda a implementação de um sistema de aviso e alerta. A leitura individual das componentes principais (FAC 1 a FAC 4 representadas na mesma figura) permite uma melhor compreensão dos fatores que explicam a vulnerabilidade em cada unidade de análise.

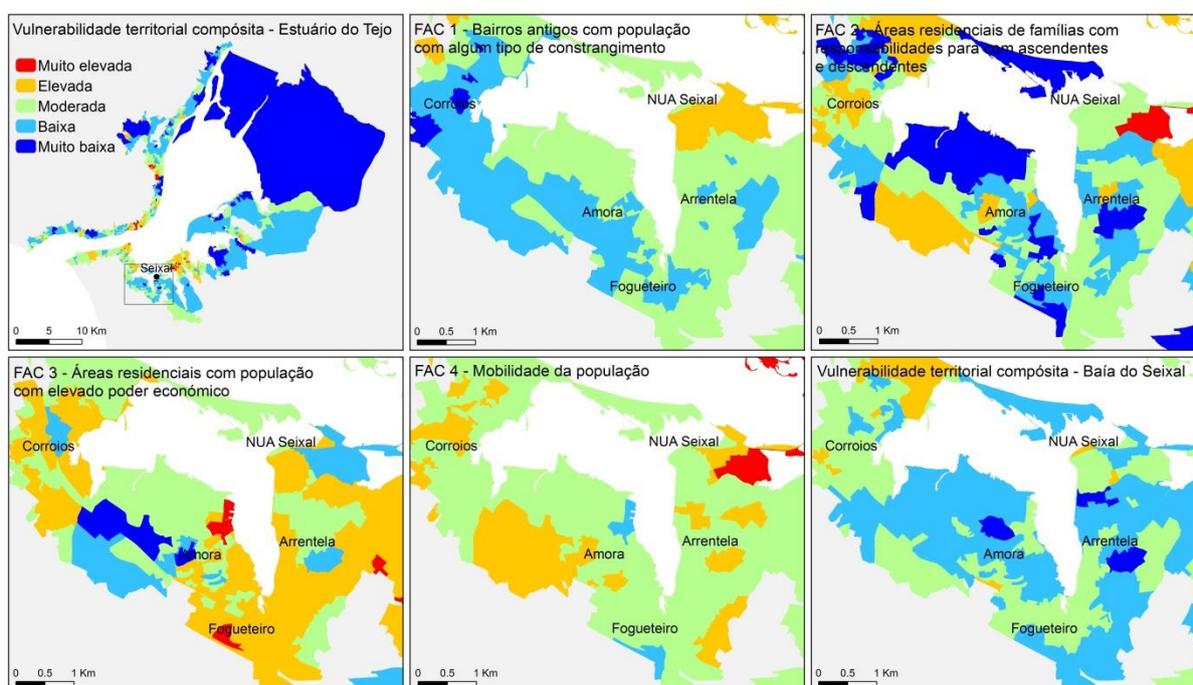


Figura 5. Vulnerabilidade territorial e suas componentes principais na área ribeirinha do concelho de Seixal.

Observa-se por exemplo que algumas secções estatísticas na zona do Fogueteiro e da Amora são caracterizadas por baixos scores na componente relativa à população com elevado poder económico (FAC 3). O fator mobilidade como descritivo de vulnerabilidade parece associado às áreas de maior densidade urbana onde a população, segundo os dados dos Censos de 2011, apresenta duas características particulares: maior duração média da deslocação para o local de estudo ou trabalho e maior dependência do transporte fluvial para essa mesma tipologia de deslocações. O Núcleo Urbano Antigo (NUA) do Seixal salienta-se como uma das áreas mais vulneráveis, justificada pelo elevado score das 4 secções estatísticas que o compõem, quer ao nível das habilitações literárias (FAC 7), quer na densidade demográfica e de edifícios (FAC 8).

5. ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO E IMPACTOS

5.1. Análise da exposição

A análise da exposição à inundação no Concelho do Seixal visa identificar os elementos existentes no território municipal que estão diretamente expostos a inundação, e respetivas funções, de modo a se obter uma estimativa dos impactos diretos e indiretos. A tipologia de elementos expostos considerada é aquela definida em Julião *et al.* (2009).

Para fins de gestão do risco com recurso a sistemas de aviso e alerta, a sobreposição dos elementos referidos é realizada com os cenários de inundação para a situação atual, nos períodos de retorno de 20 e 100 anos. A análise evidencia um elevado número de vias rodoviárias afetadas – algumas delas estruturantes no contexto municipal, sobretudo os que realizam a ligação entre aglomerados populacionais ao longo da faixa marginal da Ba ia do Seixal. A sobreposição com os referidos cenários de perigosidade evidencia também um número significativo de edifícios residenciais e comerciais, bem como outras infraestruturas tais como embarcadouros, apoios de pesca, parques de estacionamento e equipamentos públicos e militares. Os aglomerados urbanos mais afetados por inundação são o Seixal – e especificamente o seu Núcleo Urbano Antigo – e a Amora.

5.2 Análise dos impactos

A previsão dos impactos diretos e potenciais bem como as disrupções em serviç os e atividades econ micas serve o propósito de auxiliar na seleção dos pontos de aviso e alerta onde se procederá à monitorização dos níveis de perigosidade   inundação.

A análise dos impactos para as áreas identificadas na cartografia de perigosidade baseia-se na avaliação da vulnerabilidade territorial, dando aplicação às distintas dimensões de vulnerabilidade resultantes da ACP realizada ao nível da secção estatística. Das 8 componentes principais extraem-se níveis quantificados de vulnerabilidade em dimensões como a mobilidade, idade e constrangimentos da população, o seu nível educacional e as condições dos edifícios e alojamentos.

Assim, a análise preliminar efetuada evidenciou como áreas mais críticas ao nível dos impactos esperados (i) a interrupção da circulação rodoviária nas vias marginais na Amora e no NUA do Seixal; (ii) a inundação dos pisos térreos dos edifícios afetando sobretudo a atividade comercial e funções específicas, de que são exemplo locais onde se verifica a concentração frequente de elevado número de pessoas – Centro de Trabalho do PCP no Seixal e a Igreja de Nossa Senhora da Conceição (esta última também pela função de capela mortuária), ambos situados no NUA do Seixal; (iii) a afetação da atividade de alguns equipamentos públicos e privados (instalações militares, marítimas, desportivas e aquícolas, por exemplo).

Tendo em conta a análise combinada dos produtos obtidos na avaliação da perigosidade e da vulnerabilidade territorial e posterior análise da exposição e impactos foram identificados 10 pontos de aviso e alerta definidos nas áreas de maior risco (Quadro 2). Este Quadro mostra que a tipologia de elementos expostos observada nos cenários de inundação para 20 e 100 anos de recorrência é sensivelmente a mesma. Com efeito, os elementos localizados próximo   LMPMAVE são afetados em ambos os cenários, existindo diferenç as

sobretudo ao nível da quantidade de elementos – por exemplo, do número de edifícios em área inundável. O acesso à restinga do Alfeite por via rodoviária é igualmente afetado em ambas as situações, não havendo ademais outra alternativa de acesso por terra a este local, o que o torna particularmente vulnerável. A informação obtida tem aplicação igualmente no próprio planeamento de emergência, permitindo antecipar a magnitude em que as operações da proteção civil poderão ser impactadas.

Quadro 2. Características das áreas de influência dos pontos críticos que integram o sistema de aviso e alerta. O índice refere-se à área de influência dos pontos críticos para o alerta; PR=período de retorno, NA=não afetado

Designação	Índice I		Vulnerab. Territorial	Tipologia de elementos expostos	
	PR= 20 anos	PR= 100 anos		PR= 20 anos	PR= 100 anos
Restinga do Alfeite	3	4	Baixa	Rodovia de acesso aos edifícios e infraestruturas públicas e militares. Cais. Embarcações.	Rodovia de acesso e os edifícios e infraestruturas públicas e militares. Cais. Embarcações.
Base de Fuzileiros	4	4	Moderada	Apoios de pesca localizados na pequena restinga.	
Ecomuseu Moinho	4	4	Moderada	Edifício do Ecomuseu Moinho de Maré. Instalações aquícolas.	
Clube de canoagem	2	3	Moderada	R. dos Operários. Cais do Clube de Canoagem da Amora. Estaleiro Naval Venamar. Embarcações.	
Amora – Praça 5 de Outubro	3	4	Baixa	R. Fonte de Praia. Lg. Manuel António da Costa. Av. Silva Gomes. Edifícios residenciais e comerciais. Armazéns. Parque Ribeirinho da Amora. Veículos. Cais da Associação Naval Amorense. Embarcações.	
Curva da Mundet	4	4	Moderada	Av. D. Nuno Alvares Pereira. Tv. dos Catraeiros. Bc. dos Cordoeiros. Parque de estacionamento. Veículos. Cais da Mundet. Embarcações.	Av. D. Nuno Alvares Pereira. Tv. dos Catraeiros. Bc. dos Cordoeiros. R. 1º de Dezembro. R. Carpinteiros de Machado. Tv. da Estalagem. Pç 1º de Maio. Edifícios residenciais e comerciais. Parque de estacionamento. Veículos. Cais da Mundet. Embarcações.
Igreja do Seixal	4	4	Elevada	Av. D. Nuno Alvares Pereira. R. da Ermida. R. Fernando de Sousa. Edifícios residenciais e comerciais. Património edificado. Quiosque e esplanada. Veículos.	
PCP do Seixal	4	4	Elevada	Av. D. Nuno Alvares Pereira. R. Paiva Coelho. R. dos Corticeiros. R. João de Deus. R. dos Pescadores. Edifícios residenciais e comerciais. Parque de estacionamento. Veículos. Jardim público da Praça dos Mártires da Liberdade. Cais da Associação Náutica do Seixal. Embarcações.	
Terminal da Transtejo	NA	3	Baixa	Cais da Transtejo. Embarcações.	
Instituto Hidrográfico	3	4	Moderada	Av. MUD Juvenil. Edifícios em banda. Equipamento desportivo do Centro de Estágios e Formação do SLB. Edifícios e infraestruturas do Instituto Hidrográfico. Forno de cal da Azinheira.	

6. PLATAFORMA WEBSIG E SISTEMA DE AVISO E ALERTA

Os avanços na tecnologia *web*, assim como a necessidade de providenciar acesso à informação a partir de dispositivos fixos e móveis de forma ágil, têm vindo a promover o desenvolvimento de plataformas *web* computacionais flexíveis, interativas e baseadas em SIGs. Estas plataformas permitem alterar os paradigmas na gestão diária e da emergência nas zonas costeiras, promovendo respostas rápidas e sustentadas na informação disponibilizada. De modo a responder a estes desafios, os resultados do projeto MOLINES

foram integrados numa plataforma *WebSIG*, conceptualizada para dar resposta aos seguintes requisitos: 1) ser atualizada diariamente para dar acesso aos produtos da previsão em tempo real; 2) dar acesso fácil a produtos estáticos da análise de perigosidade, vulnerabilidade e risco; 3) permitir o acesso diferenciado de utilizadores, de modo a enquadrar diferentes níveis de responsabilidade na gestão da emergência, distintos interesses no nível de detalhe a que são disponibilizados os produtos, e permitir adaptar os produtos aos interesses específicos de cada tipo de utilizador; 4) permitir a interação com os utilizadores quer a nível de importação de informação, quer a nível de customização de alertas personalizados. A plataforma foi concebida ao longo de quatro grandes eixos: interface de alerta, interface de previsão em tempo real, interface de monitorização em tempo real e interface de análise de risco.

O sistema de alerta que está em desenvolvimento combina a variabilidade espacial e temporal da exposição com o conhecimento da vulnerabilidade do território, através da divisão espacial da zona de estudo (e sua subdivisão em pontos críticos) e da análise da evolução do alerta ao longo do evento (através da atualização temporal dos vários produtos). Assim, a interface do alerta permite, para além do acesso ao boletim de alerta (detalhado, que é enviado de forma automática à Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC)), dois modos de consultar a informação do alerta: 1) um sumário do estado de alerta nas várias zonas, que ainda assim permite o acesso direto ao alerta local, através de produtos baseados em mapas (Figura 6a); 2) informação detalhada sobre o alerta, devidamente georreferenciada (Figura 6b). Os pontos críticos definidos no ponto 5 (Quadro 2) foram integrados no sistema de aviso e alerta e encontram-se mapeados na Figura 6b.

A interface de previsão em tempo real, descrita em Fortunato *et al.* (2015), dá acesso aos produtos elaborados a partir das previsões dos modelos do estuário e do meio urbano. Para o estuário são fornecidas *layers* SIG que permitem operações de *zoom*, manuseamento/sobreposição das *layers* das diferentes previsões ao longo do dia e, no futuro, inquirição do utilizador, por seleção de coordenada no mapa, das séries temporais de níveis e de altura significativa da agitação marítima nesse ponto. A comparação automática destas previsões com a rede sensores *online* no estuário (marégrafos de Cascais e VTS, e bóia da APL) está também disponível na plataforma na interface para monitorização. Finalmente é ainda possível aceder aos produtos estáticos de análise de risco: perigosidade, vulnerabilidade e, no futuro, risco. Os produtos estão disponíveis de modo análogo aos níveis de previsão, permitindo operações semelhantes. Os detalhes tecnológicos da implementação desta plataforma assim como do sistema de previsão em tempo real podem ser consultados em Fortunato *et al.* (2015).

O sistema de alerta irá suportar a emissão de avisos à população pela ANPC e serviços municipais de proteção civil. A escolha dos canais adequados à emissão deste aviso deverá ter em conta o tipo de risco em causa e a sua evolução temporal, assim como as características da população local.

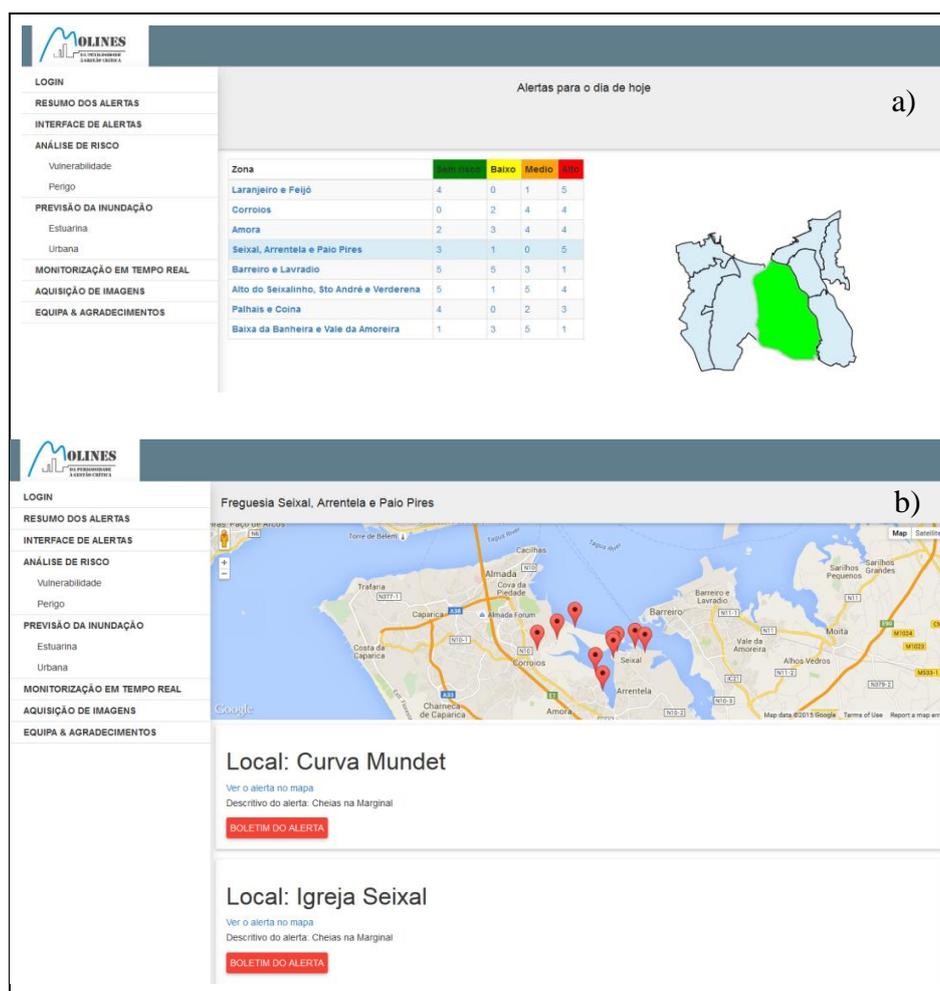


Figura 6. Interface de alerta na plataforma WebGIS: a) resumo dos alertas; b) descrição detalhada do alerta local.

7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

No âmbito do projeto MOLINES construiu-se e aplicou-se ao estuário do Tejo uma abordagem conceptual inovadora, estruturada em duas escalas espaciais de análise e que adota uma visão integrada da gestão do risco. Uma plataforma *WebSIG* conceptualizada para o efeito incorpora os resultados do projeto e fornece uma interface de alerta, de previsão e de monitorização em tempo real, e de análise de risco. A análise dos dados históricos de ocorrências de inundação foi relevante na avaliação preliminar do risco, através de informação sobre o tipo de impactos e fatores desencadeantes do processo de inundação da zona de estudo. O histórico também contribuiu para a validação das ferramentas de previsão usadas na avaliação da perigosidade. A expressão cartográfica da perigosidade combinada com o modelo de vulnerabilidade territorial, desenvolvido às duas escalas espaciais, e a análise da exposição e dos impactos permitiu a seleção de pontos críticos que foram integrados no sistema de aviso e alerta. Como trabalho futuro refere-se a entrada em operacionalização do sistema de alerta, e a definição de um conjunto de

orientações e recomendações para suporte de instrumentos de gestão, incluindo a adaptação e mitigação do risco e o planeamento da emergência.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto MOLINES (PTDC/AAG-MAA/2811/2012), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Os autores agradecem a disponibilização de informação ao projeto DISASTER (PTDC/CS-GEO/103231/2008), Administração do Porto de Lisboa, Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Direção Geral do Território, Câmara Municipal do Seixal e União das Freguesias de Seixal, Arrentela e Aldeia de Paio Pires.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aerts, J.C., Lin, N., Botzen, W., Emanuel, K., de Moel, H. (2013). Low-probability flood risk modeling for New York City. *Risk Analysis* 33(5):772-88.
- Bertin, X., Prouteau, E., Leterel, C. (2013). A significant increase in wave height in the Atlantic over the 20th century, *Global and Planetary Change*, 106 : 77-83.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Zhang, Y., Breilh, J.F., Chaumillon, E. (2014). A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay. *Coastal Engineering*, 94: 80-89.
- Breilh, J.-F., Bertin, X., Chaumillon, E., Giloy, N., Sauzeau, T. (2014). How frequent is storm-induced flooding in the central part of the Bay of Biscay? *Global and Planetary Change*, 122: 161-175
- Cluckie, I.D., Griffith, R.J., Harpin, R., Qin, J., Wicks, J.M. (2000). *Forecasting extreme water levels in estuaries for flood warning. Stage 2: Review of external forecasts and numerical modelling techniques*. R&D ProjectRecordW5/010/2. Environment Agency, 69, Bristol.
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Bronnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, O., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., Worley, S.J. (2011). The 20th century reanalysis project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 1-28.
- Cutter, S., Boruff, B.J, Shirley, W.L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84,2: 242–261.
- Defra / Environment Agency (2006). *Flood and coastal defense R&D programme. Flood risks to people. Phase 2. FD2321/TR2. Guidance Document*, 82p.
- Fortunato, A.B., Oliveira, A., Baptista, A.M. (1999). On the Effect of Tidal Flats on the Hydrodynamics of the Tagus Estuary. *Oceanologic Acta*, 22/1, 31-44.
- 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, 1: 60 - 71.
- Fortunato, A.B., Costa, R.T., Rogeiro, J., Gomes, J.L., Li, K., Oliveira, A., Freire, P., Rilo, A., Mendes, A., Rodrigues, M. (2015). Desenvolvimento de um sistema operacional de previsão dos níveis extremos na costa portuguesa. *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 14-16 outubro 2015.

- Fortunato A.B., Li K., Bertin X., Rodrigues M., Miguez B.M. (em revisão). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast, *Ocean Engineering*.
- Freire, P. e 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). Typification of estuarine margins. The case of Tagus estuary. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico*, 319-322.
- Guerreiro M., Fortunato A.B., Freire P., Rilo A., Taborda R., Freitas M.C., Andrade C., Silva T., Rodrigues M., Bertin X., Azevedo A. (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(1): 65-80.
- INE (2012). *Census 2011- Resultados definitivos – Região de Lisboa*. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, Portugal, 320 p.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. ISBN 978-1-107-66182-0.
- IRGC (2005). *Risk Governance: Towards an Integrative Approach. White Paper 1*. International Risk Governance Council, Geneva, 156 p.
- Julião, R.P., Nery, F., Ribeiro, J.L., Branco, M.C., Zêzere, J.L. (2009). *Guia Metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal*. Lisboa, Autoridade Nacional de Proteção Civil/Direção-Geral do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Urbano/Instituto Geográfico Português, 92 p.
- Morris, B.D., Foulsham, E., Hanslow, D. (2013). An improved methodology for regional assessment of tidal inundation hazards in NSW estuaries. *21st Australasian Coasts & Ports; Conf. Proc.*, Sydney, 10-13 September 2013.
- Muir-Wood, R. (2011). The 1941 February 15th Windstorm in the Iberian Peninsula. *Trébol*, 56: 4-13.
- Neves, F.S. (2010). *Dynamics and hydrology of the Tagus estuary: results from in situ observations*. Ph.D. Thesis, University of Lisbon, Portugal, 210p.
- Nogueira Mendes, R., Ceia, R., Silva, T., Rilo, A., Guerreiro, M., Catalão, J., Taborda, R., Freitas, M. C., Andrade, A., Melo, R., Fortunato, A.B., Freire, P. (2012). Remote sensing and intertidal cartography. Contribution of the MorFeed project. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico*, 341-344
- Rilo A., Freire P., Mendes R.N., Ceia R., Catalão J., Taborda R., Melo R., Caçador M.I., Freitas M.C., Fortunato A.B., Alves E. (2014). Methodological framework for the definition and demarcation of the highest astronomical tide line in estuaries: the case of Tagus Estuary (Portugal), *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 14(1): 95-107.
- Santos, P., Tavares, A., Zêzere, J. (2014). Risk analysis for local management from hydrogeomorphologic disaster databases. *Environmental Science & Policy*. 40: 85-100.
- Tavares, A.O., Santos, P.P., Freire, P., Fortunato, A.B., Rilo, A., Sá, L. (2015). Flooding hazard in the Tagus estuarine area: The challenge of scale in vulnerability assessments, *Environmental Science and Policy*, 51:238-255.
- UNISDR (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 25p. (<http://www.wcdrr.org/uploads/EN7.pdf>).