

AVALIAÇÃO DO RISCO DE INUNDAÇÕES DE ORIGEM OCEÂNICA NA RIA DE AVEIRO

Carina L. LOPES¹; Fátima L. ALVES²; João M. DIAS¹

RESUMO

As inundações são atualmente uma das maiores ameaças às regiões costeiras, afetando milhões de pessoas, atividades socioeconómicas e ecossistemas naturais. Ocorrem essencialmente durante condições atmosféricas adversas, e prevê-se que sejam amplificadas futuramente em resposta às alterações climáticas. A Ria de Aveiro é uma laguna costeira propensa a inundações uma vez que as áreas adjacentes aos canais apresentam cotas baixas. Atendendo a estas características, o presente estudo tem como objetivo mapear as zonas inundáveis e o risco de inundações de origem oceânica neste sistema para o presente e em cenários de alterações climáticas. Para atingir este objetivo foi aplicada a metodologia Fonte – Percurso – Recetor. A avaliação dos eventos forçadores de cheia e respetiva probabilidade baseou-se na análise estatística de dados de elevação da superfície livre registados entre 1976 e 2013 no marégrafo instalado na embocadura da laguna. Considerou-se ainda um cenário de subida do nível médio do mar de 0.42 m, obtido para a costa Portuguesa através da análise estatística da altura da superfície livre para a final do séc. XXI. As características de propagação dos eventos selecionados no interior da laguna foram determinadas para cenários presentes e futuros aplicando o modelo hidrodinâmico ELCIRC. Deste modo foi determinada a extensão de inundação marginal na Ria de Aveiro sob diferentes condições. Na avaliação das consequências decorrentes do perigo de inundação foi efetuada a identificação dos elementos expostos, transpondo para ambiente SIG a extensão de inundação prevista pelo modelo hidrodinâmico. Foram identificados os seguintes elementos expostos, de acordo as orientações da Diretiva Cheias: i) a densidade populacional; ii) o edificado e tipologia funcional; iii) a rede viária do *OpenStreetMap*; iv) o uso e ocupação do solo; v) as áreas classificadas da Rede Nacional de Áreas Protegidas e Rede Natura 2000. Os resultados obtidos mostram que, no global, a extensão de inundação aumenta em cenários de alterações climáticas devido à subida do nível médio do mar. Uma vez que a extensão de inundação não aumenta equitativamente na região, foi possível identificar as regiões mais expostas ao perigo de inundação, o que permitirá definir estratégias de adaptação que visem a minimização dos respetivos danos.

Palavras-chave: alterações climáticas; inundações costeiras; modelação hidrodinâmica; subida do nível médio do mar.

¹ NMEC, CESAM, Departamento de Física da Universidade de Aveiro (carinalopes@ua.pt; joao.dias@ua.pt)

² GPGRN, CESAM, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro (malves@ua.pt)

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são territórios de interface que envolvem a interação entre a terra, o mar e a atmosfera. As características físicas destas regiões proporcionam excelentes condições para a produção biológica, sendo por isso áreas de significativa biodiversidade e de elevada importância ecológica. Complementarmente são territórios densamente povoados e locais estratégicos de desenvolvimento económico, constituindo-se como relevantes núcleos socioeconómicos. Apesar da sua elevada importância ecológica e socioeconómica, estes locais encontram-se cada vez mais, vulneráveis a pressões naturais e antropogénicas, que se têm intensificado nos últimos anos em resposta às alterações climáticas e em consequência do progressivo crescimento urbano (Nicholls *et al.*, 1999; FitzGerald *et al.*, 2008; Jonkman e Vrijling, 2008).

Atualmente as inundações constituem uma das maiores ameaças que pendem sobre os territórios costeiros, afetando milhões de pessoas, atividades e ecossistemas. Devido à reduzida cota das margens, as lagunas costeiras são consideradas particularmente sujeitas a inundações de origem marinha que ocorrem quando o nível do mar é elevado. Na verdade, níveis da superfície livre do mar elevados, causados pela combinação da maré, ondas geradas pelo vento e sobre-elevações do nível médio do mar de origem meteorológica, são reais ameaças para várias lagunas costeiras (Weisse *et al.*, 2014). Portanto, tendo como finalidade evitar e reduzir os impactos negativos das inundações e atendendo que a extensão da inundação depende da magnitude do nível da superfície livre do mar e das características morfológicas e hidrodinâmicas de cada laguna costeira, é crucial avaliar localmente a magnitude dos agentes forçadores de inundações, mapear a respetiva extensão de inundação e identificar as consequências dos eventos nas zonas afetadas.

A Ria de Aveiro é um exemplo de uma laguna costeira pouco profunda sujeita a inundações de origem marinha. Localiza-se na região centro de Portugal (Figura 1) e comunica com o oceano Atlântico através de uma única embocadura artificial construída em 1808. A hidrodinâmica da laguna é determinada por oscilações do nível da superfície livre do mar cuja propagação na laguna é fortemente dependente da sua morfologia (Plecha *et al.*, 2007; Araújo *et al.*, 2008; Picado *et al.*, 2010; Lopes *et al.*, 2011; Lopes *et al.*, 2013a). De facto, o aprofundamento do canal de entrada e dos quatro canais principais promoveu um aumento da influência marinha, aumentando entre outros, a amplitude de maré, o prisma de maré e a ameaça de intrusão salina nas regiões marginais. Atualmente, as regiões marginais mais ameaçadas pela intrusão de água salgada são os campos agrícolas inseridos no Bloco do Baixo Vouga Lagunar (BBVL) e os localizados nas extremidades do canal de S. Jacinto, que são inundados durante marés vivas e/ou quando as motas de proteção estão danificadas ou colapsam. Além disso, acredita-se que esta ameaça se amplifique no futuro em resultado de alterações climáticas, nomeadamente devido à subida do nível médio do mar.

Atendendo a esta problemática, o presente estudo tem como objetivo mapear as zonas inundáveis e o risco de inundações de origem oceânica na Ria de Aveiro para o presente e em cenários de alterações climáticas. Para atingir este objetivo foi aplicada a metodologia Fonte – Percurso – Recetor, amplamente utilizada na avaliação do risco de inundações (Kandilioti e Makropoulos, 2012; Monbaliu *et al.*, 2014; Narayan *et al.*, 2014).

Este método compreende a caracterização: dos agentes forçadores da inundação (Fonte); do meio em que se propaga a inundação (Percurso); e das consequências do evento no meio em que se propaga (Recetor). A abordagem seguida na avaliação da fonte de inundação integra a análise de probabilidade conjunta aos dados de elevação da superfície livre do mar registados, entre 1976 e 2013, no marégrafo localizado à entrada da laguna. A propagação da inundação foi simulada com o modelo hidrodinâmico ELCIRC, enquanto as consequências da inundação no recetor foram avaliadas identificando os elementos expostos presentes na região.

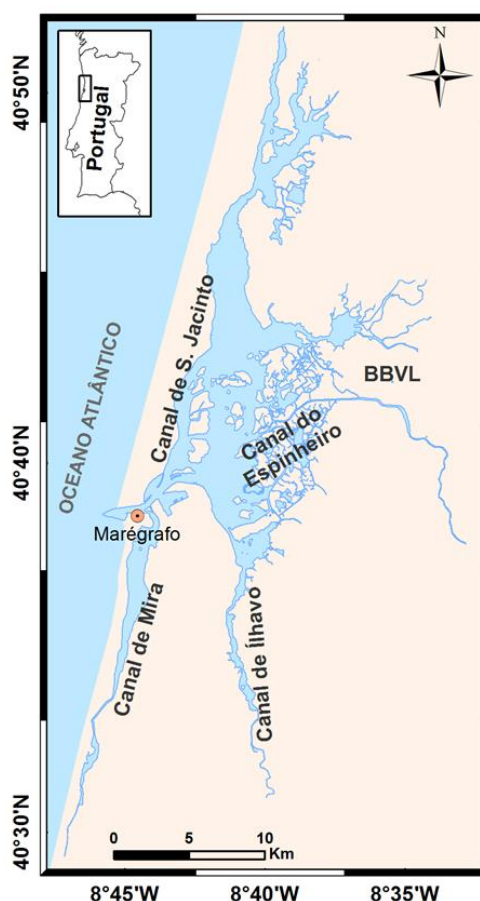


Figura 1. Localização e mapa da Ria de Aveiro.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Ria de Aveiro é uma laguna costeira pouco profunda com 45 km de comprimento e 10 km de largura que em maré viva cobre uma área que varia de 89.2 km² em preia-mar a 64.9 km² em baixa-mar (Lopes *et al.*, 2013a) (Figura 1). A laguna é composta por quatro canais principais e por uma rede complexa de canais secundários estreitos e pouco profundos. A profundidade média do canal de entrada que dá acesso ao Porto de Aveiro, 15 m (ZH), é superior à profundidade média dos restantes canais, 1 m (ZH) (Lopes *et al.*, 2013b). A laguna caracteriza-se também por possuir extensas áreas de lodaçais e sapais, que suportam uma elevada biodiversidade. A hidrodinâmica da laguna é dominada pela maré, que é semi-diurna com uma ligeira desigualdade diurna. A maré apresenta um ciclo

quinzenal de maré viva/maré morta, gerando amplitudes de maré entre 0.46 m em maré morta e 3.52 m em maré viva (Lopes e Dias, 2015).

Um aumento anormal de elevação da superfície livre do mar pode ocorrer durante condições atmosféricas adversas. De facto, o registo maregráfico à entrada da laguna destaca a ocorrência de eventos de maré meteorológica anualmente, que persistem geralmente ao longo de três dias. A altura média dessas sobre-elevações é de 0.43 m, enquanto a maior sobre-elevação registada foi de 1.09 m de altura (Lopes e Dias, 2015). A influência do vento e do caudal fluvial na hidrodinâmica da laguna é quase sempre negligenciável face à importância da maré (Dias *et al.*, 1999; Dias *et al.*, 2000; Fortunato *et al.*, 2013). No entanto, o efeito do caudal fluvial pode tornar-se relevante em situações de descargas extremas (Vaz *et al.*, 2009).

Atendendo à elevada biodiversidade e à necessidade de conservar as espécies de fauna e flora existentes neste ecossistema, a Ria de Aveiro recebeu a classificação de Zona de Proteção Especial (ZPE) no âmbito da Diretiva Aves (79/409/CEE). Recentemente foi classificada como Sítio de Importância Comunitária (SIC) (Resolução do Conselho de Ministros n.º 45/2014, de 8 de julho). Adicionalmente, uma parte da região (995.77 ha) situada entre o Oceano Atlântico e o canal de S. Jacinto é classificada como Reserva Natural das Dunas de S. Jacinto (Decreto-Lei n.º 41/79, de 6 de março; Decreto Regulamentar n.º 46/97 de 17 de novembro; Decreto Regulamentar n.º 24/2004 de 12 de julho).

As características da Ria de Aveiro proporcionam excelentes condições para fixação de inúmeras atividades económicas, incluindo industriais, pesca, aquicultura e turismo. Atualmente a Ria de Aveiro desempenha um papel crucial na economia regional e nacional, contribuindo diretamente para mais de 12% do valor acrescentado total da região do Baixo Vouga (PLRA, 2011). Suporta também atividades tradicionais com menor impacto económico, mas com importância na subsistência da comunidade local, como a salinicultura, a pesca artesanal, a apanha de marisco e de casulo e a pesca recreativa.

3. METODOLOGIA

A metodologia seguida neste trabalho consiste na aplicação do modelo concetual Fonte-Percurso-Recetor. Inicialmente será apresentada a caracterização dos agentes forçadores de inundações de origem marinha na Ria de Aveiro. Nesse âmbito será feita uma análise estatística aos dados de elevação da superfície livre registados no mareógrafo localizado à entrada da laguna entre 1976 e 2013. Mais concretamente efetuou-se a separação de componente astronómica e meteorológica da maré e aplicou-se o método de probabilidade conjunta, determinando-se assim níveis máximos para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Seguidamente, a fim de caracterizar a propagação da inundação, aplicou-se à laguna o modelo 2D hidrodinâmico ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004), previamente calibrado para a maré e validado para eventos de maré meteorológica por Lopes *et al.* (2013a) e Lopes e Dias (2015), respetivamente. Foram efetuadas várias simulações, considerando como forçamento os níveis máximos de retorno determinados previamente, e admitiu-se ainda um cenário de subida do nível médio do mar de 0.42 m para o final do séc. XXI em resposta às alterações climáticas (Lopes *et al.*, 2011).

Uma vez delimitada a área de inundação para os diferentes níveis máximos de retorno, procedeu-se à avaliação dos elementos expostos no meio de propagação. Com este propósito transpôs-se para ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) a extensão de cheia, sobrepondo-a a informação geográfica da região. De seguida identificaram-se os elementos expostos de acordo as orientações da Diretiva Cheias (2007/60/CE): i) a densidade populacional; ii) o edificado e tipologia funcional; iii) a rede viária do OpenStreetMap; iv) o uso e ocupação do solo; v) as áreas classificadas da Rede Nacional de Áreas Protegidas e Rede Natura 2000.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fonte – Caracterização dos níveis máximos de elevação na embocadura

Os dados horários de elevação da superfície livre registados à entrada da laguna entre 1976 e 2013 foram analisados de forma a determinar níveis máximos de retorno à entrada da laguna. As séries anuais de elevação foram decompostas em maré astronómica e meteorológica através de análise harmónica utilizando as ferramentas incluídas no pacote *t_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002). As componentes, astronómica e meteorológica, foram analisadas independentemente. Relativamente à componente astronómica procedeu-se à reconstituição dos níveis de maré num período de 18.6 anos (duração de um ciclo de revolução dos nodos da órbita lunar). Seleccionaram-se todos os níveis iguais ou superiores a 3.3 m, que correspondem ao nível médio de preia-mar de água vivas, tal como recomendado por Pugh (2004). Estes níveis foram agrupados em intervalos de 0.01 m, e a probabilidade de ocorrência de cada intervalo foi calculada contabilizando o número de ocorrências correspondente a cada intervalo (Figura 2a).

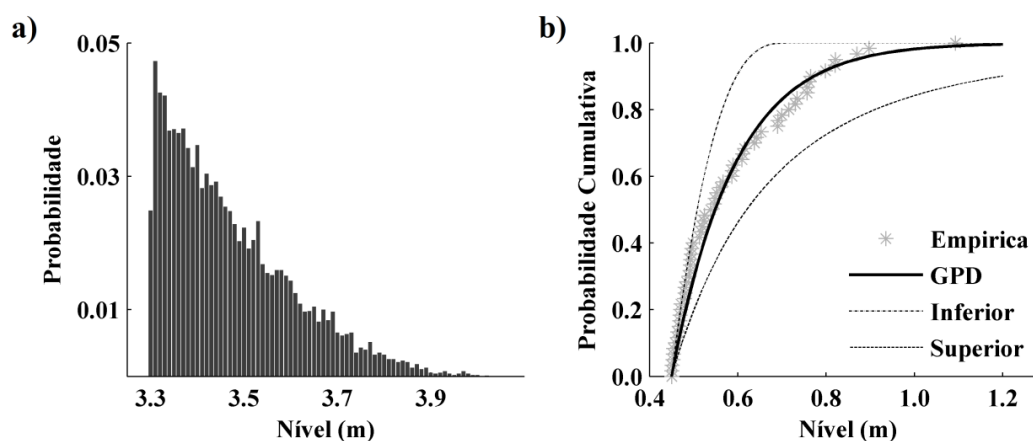


Figura 2. a) Probabilidade de ocorrência dos níveis de maré astronómica; b) Distribuições cumulativas teórica e empírica (GPD, 5%, 95%) dos níveis de maré meteorológica.

Quanto às séries de maré meteorológica, identificaram-se todos os eventos de altura máxima igual ou superior a 0.45 m. Calculou-se em seguida a Função de Distribuição Cumulativa (CDF) empírica destes eventos, através da aplicação do método apresentado por Kaplan e Meier (1958). Os parâmetros mais prováveis da *Distribuição Generalized Pareto* (GPD) foram determinados, bem como os limites inferior e superior a um nível de

confiança de 90%, a fim de investigar o ajustamento entre a função empírica e a distribuição GPD (Figura 2b). Os resultados evidenciam que a distribuição empírica, CDF, é estatisticamente semelhante à distribuição GPD a um nível de confiança de 90%, uma vez que a distribuição empírica está compreendida entre os limites inferior e superior da distribuição GPD. Uma vez que o coeficiente de correlação entre a maré astronómica e eventos de maré meteorológica é igual a -0.0015 para o marégrafo de Aveiro (Fortunato *et al.*, 2013), a probabilidade de um nível de maré astronómica A_i ocorrer em simultâneo com um pico de maré meteorológica R_i é dada por:

$$P(R_i \cap A_i) = P(R_i) \times P(A_i) \quad (1)$$

$P(R_i \cap A_i)$ - Probabilidade conjunta;

$P(R_i)$ - Probabilidade de um evento de maré meteorológica;

$P(A_i)$ - Probabilidade de um nível de maré astronómica.

O nível médio do mar não foi corrigido para o período em estudo, pois da análise efetuada aos registos maregráficos de Aveiro entre 1976 e 2013 verificou-se que o nível médio do mar aumentou aproximadamente 8 cm neste período, o que se considera negligenciável face aos níveis de maré astronómica e meteorológica (taxa de 2.2 mm/ano neste período). Seguindo esta metodologia obtiveram-se os níveis máximos de retorno apresentados na Tabela 1, que evidenciam uma diferença de 0.71 m entre as estimativas de 100 e 2 anos de retorno. Esta diferença está coerente com as observações, uma vez que a diferença entre as alturas máxima e mínima de eventos de maré meteorológica registados à entrada da laguna é de 0.77 m (máximo de 1.09 m e mínimo de 0.32 m). Note-se que os níveis estimados por esta metodologia são ligeiramente superiores aos estimados por Fortunato *et al.* (2013) (4.20 m, 4.32, 4.41 e 4.48 para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos, respetivamente), com as maiores diferenças encontradas para os períodos de retorno mais elevados.

Tabela 1. Níveis máximos de retorno (m) relativamente ao zero hidrográfico (ZH).

Período de retorno (anos)	2	10	25	50	100
Nível máximo (m)	3.85	4.23	4.37	4.47	4.56

4.2 Percurso – Propagação da inundação na Ria de Aveiro

A hidrodinâmica da Ria de Aveiro foi reproduzida aplicando o modelo hidrodinâmico 2D ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004). A configura o do modelo utilizado neste trabalho foi desenvolvida e calibrada para a propaga o da maré por Lopes *et al.* (2013a), e validada para eventos de maré meteorológica por Lopes e Dias (2015). Esta configura o inclui na grelha numérica todas as áreas entre marés, as áreas marginais da laguna e estruturas de prote o contra inunda es existentes, entre as quais o dique do BBVL que constitui um importante obstáculo   intrusão salina na região. A informa o topo-hidrográfica integrada na malha numérica inclui vários levantamentos efetuados na região entre 2006 e 2012 (Lopes *et al.*, 2013a).

A fim de caracterizar a propaga o das inunda es de origem marinha, para o presente e em condi es de altera es climáticas, realizou-se um conjunto de 10 simula es (Tabela

2), 5 para cada um dos climas a que correspondem níveis máximos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos. A única diferença entre os climas presente e futuro é o nível médio do mar, que é mais elevado 0.42 m para o futuro. As séries temporais de elevação da superfície livre impostas na fronteira oceânica correspondem à soma das séries temporais de maré astronómica, maré meteorológica e nível médio do mar. A série de maré meteorológica foi construída sinteticamente de acordo com uma função *seno* admitindo que os eventos têm a duração de 3 dias, enquanto a série de maré astronómica foi obtida por síntese harmónica. As duas séries foram combinadas para que o nível de maré de 3.3 m (correspondente ao nível médio de preia-mar de água vivas) fosse coincidente com o pico de maré meteorológica. Para cada cenário simulado determinou-se a extensão da inundação (Figura 3), a área total inundada e a área marginal inundada relativamente a uma maré média (75.1 km²) (Tabela 3).

Tabela 2. Definição dos níveis de maré astronómica, maré meteorológica e médio do mar a impor como condição fronteira no modelo numérico em cada cenário.

		Nível de maré (m)	Nível de maré meteorológica (m)	Nível médio do mar (m)	Nível máximo (m)
Clima Presente	P1	3.30	0.55	0.00	3.85
	P2	3.30	0.93	0.00	4.23
	P3	3.30	1.07	0.00	4.37
	P4	3.30	1.17	0.00	4.47
	P5	3.30	1.26	0.00	4.56
Clima Futuro	F1	3.30	0.55	0.42	4.27
	F2	3.30	0.93	0.42	4.65
	F3	3.30	1.07	0.42	4.79
	F4	3.30	1.17	0.42	4.89
	F5	3.30	1.26	0.42	4.98

Tabela 3. Área inundada ($\times 10^6 \text{m}^2$) em cada cenário simulado.

	Clima Presente					Clima Futuro				
	P1	P2	P3	P4	P5	F1	F2	F3	F4	F5
Área total	101.5	117.4	120.5	124.5	128.3	120.9	136.0	141.6	146.0	150.0
Área marginal	26.4	42.3	45.4	49.4	53.2	45.8	60.9	66.5	70.9	74.9

Os resultados mostram que a área inundada é tanto maior quanto maior o nível máximo de elevação imposto na fronteira oceânica, tal como seria de esperar num sistema como a Ria de Aveiro que apresenta margens planas e de cotas baixas. Por outro lado, constata-se que a área inundada para o clima futuro é, em média, 20 km² superior à área inundada atualmente. O mapa de extensão de inundação mostra que esse aumento não é uniforme, existindo zonas mais suscetíveis a inundações do que outras. De facto, as áreas marginais localizadas na zona central da laguna e nas extremidades do canal de S. Jacinto são as que apresentam maior suscetibilidade à inundação na área de estudo. A dependência da extensão de inundação com a magnitude da elevação da superfície livre do mar já foi verificada anteriormente por Lopes *et al.* (2013a), Lopes *et al.* (2013b) e Lopes e Dias

(2015). O trabalho realizado por Lopes *et al.* (2013b) estima que a área lagunar aumentou cerca de 16% entre 1987 e 2012 em condições de maré viva, aumentando a ameaça de inundações de origem marinha nas regiões marginais da laguna. Os mapas de extensão de inundação reportados neste trabalho mostram que a tendência de aumento da suscetibilidade a inundações de origem marinha verificada no passado recente tende a agravar-se em cenários de subida do nível médio do mar.

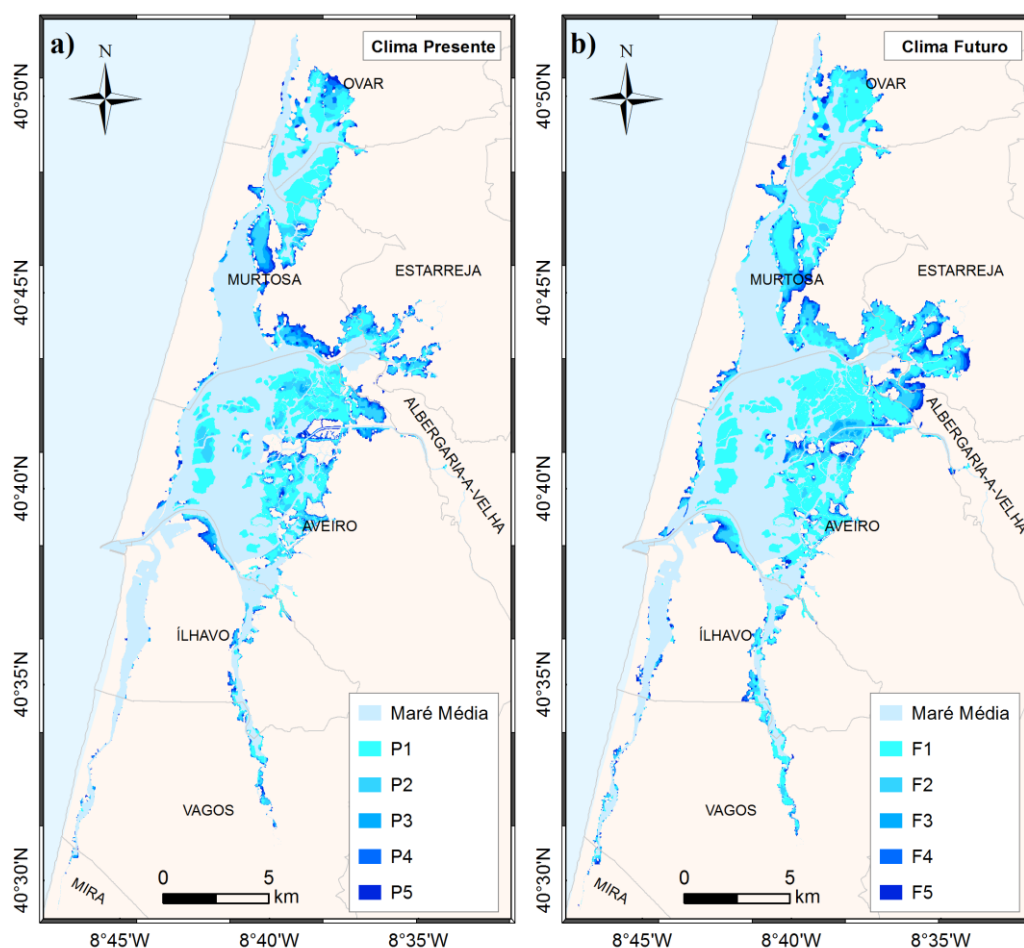


Figura 3. Mapas de extensão de inundação para: a) Clima presente; b) Clima futuro.

4.3 Recetor – Identificação dos elementos expostos na região da Ria de Aveiro

A extensão de inundação prevista pelo modelo hidrodinâmico foi sobreposta a informação geográfica da região e foram identificados os elementos expostos. Os dados de população residente recolhidos no último recenseamento geral da população (Censos 2011), e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) foram usados para quantificar o número de habitantes expostos ao perigo de inundação em cada um dos cenários simulados. A Base Cartográfica dos Censos (BGRI 2011) foi usada efetuando-se uma desagregação ao local. Os resultados (Figura 4) mostram, tal como esperado, que o número de habitantes potencialmente afetados pelas inundações será tanto maior quanto maior a elevação da superfície livre. Considerando o clima presente, verifica-se que o número de habitantes potencialmente afetados por eventos de inundação varia entre 189 e 1567 para

períodos de retorno de 2 e 100 anos, respetivamente. Acresce ainda o fato de que o número de pessoas que podem vir a ser afetadas em condições de alterações climáticas aumenta significativamente, em relação ao clima presente. Por exemplo, estima-se que um evento com o período de retorno de 2 anos no clima presente afete 189 habitantes, enquanto um evento com o mesmo período de retorno no clima futuro, afetará 829 habitantes, o que representa um aumento de cerca de 338%. Esta constatação ilustra, de modo inequívoco, a elevada vulnerabilidade social potencial na região de estudo.

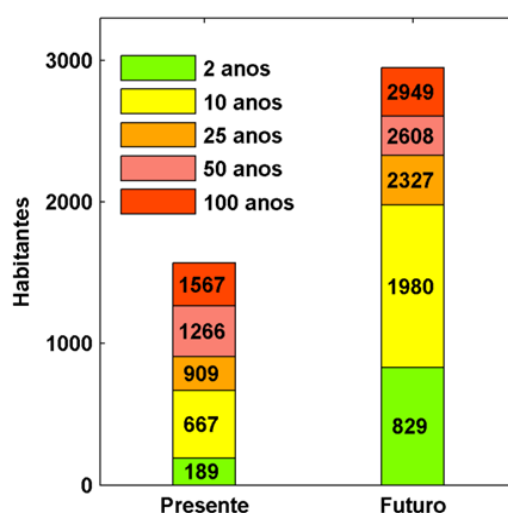


Figura 4. Número de habitantes expostos   inundação para cada cenário considerado.

Seguidamente procedeu-se   identificação do edificado exposto a inundações na região da Ria de Aveiro. O edificado foi inventariado e classificado de acordo com as suas características funcionais, isto é, edifícios residenciais, comerciais, industriais, de serviç os, agrícolas, aquícolas e sal colas. Da sobreposição da área de extensão da inundação com o edificado da região em estudo, verifica-se que a área edificada exposta ao perigo de inundação é tanto maior quanto maior a elevação da superfície livre (Tabela 4). Constata-se ainda que a área inundada de edifícios com funções industriais, comerciais e residenciais é significativamente superior   das restantes tipologias (de serviç os, agrícolas, aquícolas e sal colas) para todos os cenários considerados. De facto, a área inundada de edifícios industriais, comerciais e residenciais representa mais de 90% da área total de edificado inundado. Destas três tipologias, o edificado industrial representa mais de 70% da área total de edificado inundado, em todos os cenários,   exceção do cenário P1. Os resultados mostram também que a exposição do edificado aumenta significativamente em cenários de alterações climáticas, principalmente para menores períodos de retorno. De facto, a área total de edificado inundada para um período de retorno de 2 anos aumenta cerca de 758%, de 1.2 km² no clima presente para 10.3 km² no clima futuro. Para um período de retorno de 100 anos a área de edificado inundada aumenta aproximadamente 42%, de 14.1 km² no clima presente para 20.0 km² no clima futuro.

A exposição das infraestruturas rodoviárias da região a eventos de inundação de origem marinha foi avaliada intersetando a rede viária da região com a extensão de inundação calculada pelo modelo hidrodinâmico em cada um dos cenários. A rede viária foi extraída do OpenStreetMap de acordo com a hierarquia constante no Plano Rodoviário Nacional (Decreto-Lei n  222/98, de 17 de julho): autoestrada, estrada principal, estrada secundária,

outras estradas. Uma vez que a maioria dos itinerários existentes na região em estudo se encontram na classe outras estradas, decidiu-se decompor a classe outras estradas em: outras estradas pavimentadas; caminhos de terra batida; e caminhos pedestres e ciclovias. A exposição das infraestruturas rodoviárias a inundações foi então quantificada calculando o comprimento de estradas inundadas em cada cenário (Tabela 5).

Tabela 4. Área ($\times 10^4$ m²) de edificado afetado pelas inundações.

		Residenciais	Comerciais	Industriais	Total
Clima Presente	P1	0.4	0.3	0.4	1.2
	P2	1.2	0.6	6.3	8.2
	P3	1.2	0.8	8.8	11.0
Presente	P4	1.6	1.3	9.7	12.7
	P5	1.8	1.5	10.4	14.1
Clima Futuro	F1	1.1	0.6	8.3	10.3
	F2	2.3	1.9	11.2	15.9
	F3	2.4	2.1	12.6	17.7
Futuro	F4	2.9	2.3	13.4	19.1
	F5	3.1	2.3	14.0	20.0

Tabela 5. Comprimento ($\times 10^3$ m) de infraestruturas rodoviárias inundadas.

		Autoestrada	Outras estradas pavimentadas	Caminhos de terra batida	Caminhos pedestres e ciclovias	Total
Clima Presente	P1	0.4	4.9	6.0	0.3	11.5
	P2	0.7	19.3	14.3	2.0	36.4
	P3	0.7	32.8	20.1	2.9	56.4
	P4	0.7	41.2	23.5	3.3	68.9
	P5	1.1	50.8	28.1	4.0	84.2
Clima Futuro	F1	0.7	27.8	21.2	2.8	52.5
	F2	1.1	64.9	35.4	5.2	107.1
	F3	1.2	76.2	41.7	6.4	126.0
	F4	1.3	86.2	48.1	7.9	144.2
	F5	1.7	96.9	54.0	9.5	162.9

Os resultados mostram que as classes que apresentam maior comprimento inundado são outras estradas pavimentadas e caminhos de terra batida. De facto o comprimento de outras estradas pavimentadas representa mais de 50% do comprimento total de estradas inundadas, exceto para o cenário P1 (43%). Os caminhos de terra batida representam mais de 30% do comprimento total, exceto para o cenário P1 (52%). É ainda de salientar que a exposição das infraestruturas rodoviárias a inundações de origem marinha aumenta significativamente, quando se considera o cenário de subida do nível médio do mar, particularmente para eventos com períodos de retorno de 2 anos. Efetivamente, estima-se que o comprimento de infraestruturas rodoviárias inundadas aumente 356%, de 11.5 km no clima presente para 52.5 km no clima futuro. Para um período de retorno de 100 anos a percentagem de aumento é de 93%.

A exposição do território a inundações de origem marinha foi quantificada calculando a área inundada em função do uso e ocupação do solo. Começou-se por categorizar o uso e ocupação do solo nas regiões adjacentes à laguna de acordo com as seguintes classes: residencial, comercial, residencial e comercial, industrial, atividades de defesa, alojamento restauração e similares, transporte e armazenagem, aquícola, salícola, agrícola, florestal, espaços verdes, atividades recreativas e sem uso. A categorização das regiões com atividades económicas teve por base a Classificação Portuguesa de Atividades Económicas, Revisão 3 (CAE-Rev.3). A delimitação das regiões com diferentes usos do solo teve como ponto de partida a carta de uso e ocupação do solo para 2007 (cos2007) ao nível 2. Esta carta foi sobreposta a uma imagem de satélite da região e de seguida editada de forma a detalhar o uso e ocupação do solo nas regiões 1.1 Tecido urbano e 1.2 Indústria, comércio e transporte. O mapa de uso e ocupação do solo resultante desta análise foi intersetado com a extensão de inundação produzida pelo modelo hidrodinâmico em cada um dos cenários e determinou-se a área inundada em função do uso e ocupação do território. Os resultados (Tabela 6) mostram que a maioria das regiões inundadas está inserida na classe sem uso. De facto a área inundada em regiões sem uso representa entre 60% a 80% da área marginal inundada (Tabela 1) dependendo do cenário considerado. Seguem-se em menor extensão as regiões com uso predominantemente florestal, residencial, agrícola, aquícola, industrial e de atividades de transporte e armazenagem. As restantes classes apresentam área inundada nula ou muito inferior a estas. Verifica-se que as regiões com uso e ocupação residencial, agrícola, industrial e de transporte e armazenagem apresentam elevadas taxas de oscilação de área inundada entre os cenários, refletindo uma elevada sensibilidade a inundações de origem marinha. Por exemplo, considerando o clima presente, estima-se que a área inundada de regiões agrícolas aumente cerca de 1210% para eventos de período de retorno de 100 anos (684.1 km²) em relação a eventos com 2 anos de período de retorno (52.1 km²). Verifica-se também que a área inundada aumenta em cenários de alterações climáticas em todas as classes consideradas. É de salientar que a exposição do território a eventos de inundação com o mesmo período de retorno aumenta significativamente em cenários de alterações climáticas, principalmente para períodos de retorno de 2 anos. Destaca-se a título de exemplo um aumento de 816% da área inundada com uso industrial, de 3.0 km² no clima presente para 27.5 km² no clima futuro.

A exposição de áreas classificadas que integram a Rede Nacional de Áreas Protegidas e/ou a Rede Natura 2000 foi avaliada calculando a área inundada com classificação SIC, ZPE e AP (Área Protegida). Os resultados (Tabela 7) mostram que a área inundada com classificação SIC e ZPE é idêntica e que esta corresponde quase à totalidade da área inundada (Tabela 1). Este resultado não é de todo surpreendente, uma vez que as classificações SIC e ZPE delimitam a região Ria de Aveiro. Por outro lado, a área inundada com classificação AP representa uma área significativamente menor, suscetível a ser inundada apenas quando o nível da superfície livre do mar na embocadura é igual ou superior a 4.27 m (ZH) (Tabela 1). É de salientar que nos cenários em que se considera a subida do nível médio do mar a exposição de áreas com estatuto de proteção aumenta. Particularmente, a área inundada com classificação AP aumenta 200% de 0.2 km² no clima presente para 0.6 km² no clima futuro quando se considera um período de retorno de 100 anos.

Tabela 6. Área inundada ($\times 10^4$ m²) em função do uso e ocupação do solo.

	Sem uso	Florestal	Residencial	Agrícola	Aquícola	Industrial	Transporte e armazenagem	
Clima Presente	P1	2108.9	5.8	1.6	52.1	111.4	3.0	5.2
	P2	3012.5	22.2	9.7	248.7	150.1	21.6	20.6
	P3	3330.0	33.6	21.8	405.3	161.1	30.8	28.3
	P4	3515.3	45.6	35.1	542.8	169.0	36.8	30.5
	P5	3690.4	58.5	45.2	684.1	173.9	41.0	32.8
Clima Futuro	F1	3368.8	32.7	18.1	438.6	157.6	27.5	26.6
	F2	4068.1	92.5	68.4	968.8	187.5	48.3	35.4
	F3	4308.4	129.0	85.0	1163.2	200.8	59.2	37.2
	F4	4483.8	163.1	100.8	1330.5	208.5	64.3	38.7
	F5	4611.4	203.4	117.2	1495.6	218.6	70.9	42.8

Tabela 7. Área inundada ($\times 10^4$ m²) de regiões classificadas que integram a Rede Nacional de Áreas Protegidas e/ou a Rede Natura 2000.

	SIC	ZPE	AP	
Clima Presente	P1	101.2	101.5	0.0
	P2	113.8	114.2	0.0
	P3	119.1	119.6	0.1
	P4	122.7	123.3	0.2
	P5	126.2	126.8	0.2
Clima Futuro	F1	119.7	120.2	0.1
	F2	133.4	134.2	0.3
	F3	138.3	139.3	0.4
	F4	142.4	143.4	0.5
	F5	145.9	147.0	0.6

O risco de inundação é definido na Diretiva Cheias (2007/60/CE) como a combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas. Atendendo a este conceito, e considerando as consequências prejudiciais da intrusão da água salgada nos indicadores considerados, pode-se afirmar qualitativamente que a região da Ria de Aveiro apresenta um elevado risco de inundação de origem marinha e que este tende a agravar-se significativamente em cenários de alterações climáticas com a subida do nível médio do mar. De facto, as inundações de água salgada trazem danos adicionais em relação a inundações de água doce. Por exemplo, a deposição de sal em campos agrícolas contamina os solos destruindo as culturas existentes e comprometendo a atividade nos anos seguintes. Adicionalmente, os danos são também superiores nos edifícios, onde a água salgada como é corrosiva induz frequentemente danos nas estruturas e nas componentes elétricas. Nas indústrias, este impacto é muito importante uma vez que a reparação dos danos nos componentes elétricos pode levar a períodos mais longos de interrupção laboral.

A identificação dos elementos expostos aqui apresentada cria as condições necessárias para uma avaliação quantitativa e detalhada do risco de inundações na região da Ria de

Aveiro. De facto, caracterizando as características das inundações (profundidade, duração, etc.) no meio de propagação e considerando que o dano é dependente destas características, é possível avaliar o risco de inundação de acordo com as indicações do guia de boas práticas EXCIMAP (2007). O EXCIMAP (*European Exchange Circle on Flood Mapping*) é um grupo composto por peritos na temática de inundações que publicou um manual de boas práticas sobre mapeamento de inundações (EXCIMAP, 2007) seguindo a normas da Diretiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. O risco de inundações na região da Ria de Aveiro já foi estudado anteriormente por Dias e Alves (2013) e Dias *et al.* (2014), no entanto as abordagens seguidas por estes trabalhos não compreenderam determinação do risco de inundação a partir da avaliação dos danos nos elementos socioeconómicos e ambientais expostos ao perigo de inundação. Nestes estudos determinou-se o risco global de inundação na Ria de Aveiro em função do grau de probabilidade do evento e do grau de vulnerabilidade do território afetado. Os mapas de probabilidade resultaram de mapas de extensão de inundação obtidos pelo modelo hidrodinâmico ELCIRC para cenários que combinaram diferentes condições de caudal fluvial, nível médio do mar, nível de maré astronómica e nível de maré meteorológica. Já a vulnerabilidade do território foi avaliada em 4 categorias, elevada, moderada, baixa e residual, atendendo ao uso do solo do CORINE Land Cover 2006. A partir do grau de probabilidade e vulnerabilidade foi definida uma matriz que categoriza o risco em 5 classes: extremo, elevado, moderado, baixo e residual.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho aplicou-se a metodologia Fonte-Percurso-Recetor com o intuito de caracterizar a exposição da região da Ria de Aveiro a inundações costeiras. A metodologia seguida consistiu numa abordagem multidisciplinar que integrou uma análise estatística a dados de elevação da superfície livre do mar registados entre 1976 e 2013 no marégrafo de Aveiro, modelação hidrodinâmica aplicada à Ria de Aveiro e identificação dos elementos expostos em ambiente SIG. Concluiu-se que o nível máximo à entrada da laguna varia entre 3.85 e 4.56 m (ZH), conduzindo a uma variação da área inundada entre 101.5 km² e 128.3 km² para 2 e 100 anos de período de retorno, respetivamente. Salienta-se ainda que a área inundada aumenta consideravelmente sob cenários de subida do nível médio do mar, sendo que as regiões que apresentam maior suscetibilidade estão localizadas nas extremidades do canal de S. Jacinto e na área central da laguna. Mostrou-se ainda que a exposição da laguna a inundações de origem marinha varia consideravelmente com a elevação da superfície livre imposta como condição fronteira no modelo hidrodinâmico. Particularmente, a exposição da laguna a inundações de origem marinha aumenta consideravelmente em cenários de subida do nível médio do mar, revelando que os impactos de eventos de maré meteorológica tendem a agravar-se no clima futuro. Face a estes resultados é expectável que se intensifiquem as obras de proteção às inundações que possam contribuir para uma diminuição da exposição da laguna. Por último, importa realçar a importância que assume o desenvolvimento de cartografia temática de risco, vulnerabilidade e exposição (a um determinado perigo), uma vez que esta constitui, para além de um imperativo legal, uma ferramenta técnica de apoio à gestão e implementação de medidas de mitigação e de adaptação que visem contribuir para a redução dos potenciais danos ambientais e socioeconómicos das regiões/locais.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor beneficia de uma bolsa de doutoramento (SFRH/BD/78345/2011) atribuída pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia). Este trabalho foi suportado parcialmente pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) através do CESAM (UID/AMB/50017/2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo I.B., Dias J.M., Pugh D.T. (2008). Model simulations of tidal changes in a coastal lagoon, the Ria de Aveiro (Portugal). *Continental Shelf Research* 28, 1010-1025.

Dias J.M., Alves F.L. (2013). *Risco de Cheias e Estratégias de Adaptação para a Zona Costeira e Lagunar da Ria de Aveiro*. Universidade de Aveiro, CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar. Aveiro, Portugal.

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

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

Dias J.M., Lopes J.F., Dekeyser I. (2000). Tidal propagation in Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere* 25, 369-374.

EXCIMAP, 2007. *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*. European Exchange Circle on Flood Mapping.

FitzGerald D.M., Fenster M.S., Argow B.A., Buynevich I.V. (2008). Coastal impacts due to sea-level rise. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 36, 601-647.

Fortunato A.B., Rodrigues M., Dias J.M., Lopes C.L., Oliveira A. (2013). Generating inundation maps for a coastal lagoon: A case study in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ocean Engineering* 64, 60-71.

Jonkman S.N., Vrijling J.K. (2008). Loss of life due to floods. *Journal of Flood Risk Management* 1, 43-56.

Kandiloti G., Makropoulos C. (2012). Preliminary flood risk assessment: the case of Athens. *Natural Hazards* 61, 441-468.

Kaplan E.L., Meier P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association* 53, 457-481.

Lopes C.L., Dias J.M. (2015). Assessment of flood hazard during extreme sea levels in a tidally dominated lagoon. *Natural Hazards* 77, 1345-1364.

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

Lopes C.L., Plecha S., Silva P.A., Dias J.M. (2013b). Influence of morphological changes in a lagoon flooding extension: case study of Ria de Aveiro (Portugal). *Journal of Coastal Research* SI65, 1158-1163.

- Lopes C.L., Silva P.A., Dias J.M., Rocha A., Picado A., Plecha S., Fortunato A.B. (2011). Local sea level change scenarios for the end of the 21st century and potential physical impacts in the lower Ria de Aveiro (Portugal). *Continental Shelf Research* 31, 1515-1526.
- Monbaliu J., Chen Z.Y., Felts D., Ge J.Z., Hissel F., Kappenberg J., Narayan S., Nicholls R.J., Ohle N., Schuster D., Sothmann J., Willems P. (2014). Risk assessment of estuaries under climate change: Lessons from Western Europe. *Coastal Engineering* 87, 32-49.
- Narayan S., Nicholls R.J., Clarke D., Hanson S., Reeve D., Horrillo-Caraballo J., le Cozannet G., Hissel F., Kowalska B., Parda R., Willems P., Ohle N., Zanuttigh B., Losada I., Ge J.Z., Trifonova E., Penning-Rowsell E., Vanderlinden J.P. (2014). The SPR systems model as a conceptual foundation for rapid integrated risk appraisals: Lessons from Europe. *Coastal Engineering* 87, 15-31.
- Nicholls R.J., Hoozemans F.M.J., Marchand M. (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 9, S69-S87.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE. *Computers & Geosciences* 28, 929-937.
- Picado A., Dias J.M., Fortunato A.B. (2010). Tidal changes in estuarine systems induced by local geomorphologic modifications. *Continental Shelf Research* 30, 1854-1864.
- Plecha S., Sancho F., Silva P., Dias J.M. (2007). Representative waves for morphological simulations. *Journal of Coastal Research* SI50, 995-999.
- PLRA, 2011. *Estudo de actividades económicas e suas dinâmicas*. Sociedade Polis Litoral Ria de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Pugh D. (2004). *Changing sea levels. Effects of tides, weather and climate*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Vaz N., Dias J.M., Leitao P.C. (2009). Three-dimensional modelling of a tidal channel: The Espinheiro Channel (Portugal). *Continental Shelf Research* 29, 29-41
- Weisse R., Bellafiore D., Menendez M., Mendez F., Nicholls R.J., Umgiesser G., Willems, P. (2014). Changing extreme sea levels along European coasts. *Coastal Engineering* 87, 4-14.
- Zhang Y.L., Baptista A.M., Myers E.P. (2004). A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research* 24, 2187-2214.