

Estudo da vulnerabilidade costeira à subida do nível médio do mar para Portugal Continental como consequência das alterações climáticas

Carolina ROCHA*¹, Carlos ANTUNES² e Cristina CATITA²

¹ Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

² Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa

(carolina.silrocha@gmail.com; cmantunes@fc.ul.pt; cmcatita@fc.ul.pt)

Palavras-chave: Diretiva Europeia 2007/60/CE, subida do nível médio do mar, vulnerabilidade costeira, sistemas de informação geográfica, WMS

Resumo: Portugal Continental possui centenas de milhares de pessoas na zona costeira, assim como diversas infraestruturas de grande importância económica, às quais estão sujeitas aos riscos associados à Subida do Nível Médio do Mar. No âmbito das estratégias de adaptação às alterações climáticas, é fundamental uma avaliação correta e rigorosa da vulnerabilidade física e socio-económica à futura sNMM. Este trabalho constitui um contributo para a implementação da Diretiva Comunitária Europeia 2007/60/CE que obriga a cada estado membro a avaliação da vulnerabilidade associada à sNMM e das inundações causadas pela ocorrência de eventos extremos. Desta forma, avaliou-se para 2025, 2050 e 2100 com diferentes cenários de sNMM e diferentes períodos de retorno de eventos extremos, a área de terreno em Portugal Continental afetada pela sNMM, para a qual foi produzida uma cartografia de inundação e de vulnerabilidade física costeira, numa metodologia baseada na tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os resultados deste estudo são disponibilizados através de um Web Map Service (WMS) para entidades públicas portuguesas, no âmbito de protocolos estabelecidos com Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

1. Introdução

Considerando que vivem atualmente em Portugal centenas de milhares de pessoas na zona costeira com risco potencial de serem afetadas pela subida do nível médio do mar (sNMM), bem como, a existência de infraestruturas de elevada importância económica, sejam elas de transportes, de administração pública e serviços, de turismo, ou de outra qualquer atividade, o risco associado à sNMM aumentará progressivamente no futuro, à medida da taxa de subida e do aumento da exposição ao risco. A avaliação da vulnerabilidade à sNMM das zonas urbanas costeiras é de crucial importância para a adoção de medidas e estratégias de adaptação às alterações climáticas.

O cumprimento dos requisitos impostos pela Diretiva Comunitária 2007/60/CE, transposta para a lei nacional através do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro, obriga as instituições nacionais a elaborar a cartografia de risco, identificando, numa primeira fase as zonas de maior vulnerabilidade, e numa segunda fase, a execução da respetiva cartografia de risco com o máximo rigor posicional. No âmbito desta diretiva, o trabalho que aqui se apresenta, constitui um contributo para a elaboração da cartografia de inundação e vulnerabilidade costeira. Para o efeito, são usados cenários de sNMM, para os horizontes temporais de 2025, 2050 e 2100, com diferentes períodos de retorno de eventos extremos, sendo que a metodologia e os resultados obtidos estão descritos na comunicação de Antunes *et al.* (2018). Nesta comunicação serão apresentados somente os resultados da cartografia de vulnerabilidade física costeira para 2050 e 2100.

Este estudo aplica uma metodologia, baseada na tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e na aplicação do método de análise multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que permite avaliar o impacto e a extensão territorial costeira afetada por cenários de subida do Nível Médio do Mar, através da estimativa de extremos máximos do nível das águas do mar. Os resultados desta metodologia conduziram à elaboração de uma Cartografia de Inundação Extrema e de Vulnerabilidade Física da zona costeira do território continental, resultante da espacialização dos cenários de subida do NMM e baseado na topografia atual de terreno, com uma resolução espacial de 20 m, no sistema de coordenadas ETRS89/PT-TM06.

2. Metodologia

O processo metodológico aplicado encontra-se esquematizado na Figura 1. Numa primeira etapa fez-se a recolha e organização de toda a informação e dados necessários à construção do modelo proposto. Essa informação, foi obtida maioritariamente, em fontes de domínio público e da informação oficial e não oficial disponibilizada pelos diversos organismos nacionais (Associação Portuguesa do Ambiente, Direção Geral do Território e Instituto Hidrográfico).

Numa segunda fase, houve a necessidade de tratar todos os dados de modo a conseguir incorporá-los e harmonizá-los no modelo, satisfazendo assim os objetivos propostos. O fluxo do processo metodológico exemplifica uma base de dados acessível, tendo a capacidade de armazenamento de dados espaciais (rede hidrográfica, linha de costa, tipo de costa, geologia, litologia e uso do solo), bem como de informação alfanumérica (pontos cotados provenientes das ortofotos, etc.). Estes dados foram tratados através de funções SIG de modo a obter mapas normalizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade costeira.

Como já foi referido, para a realização deste projeto foram necessários diversos dados de modo a avaliar os objetivos propostos. A utilização dos Vértices Geodésicos nacionais teve como propósito a validação do Modelo Digital de Terreno, criado a partir de pontos cotados proveniente do levantamento aerofotogramétrico de 2008 disponibilizado pela Direção Geral do Território (DGT). É através da Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP 2015) que se obtém com rigor as áreas vulneráveis de cada freguesia, consoante cada nível de vulnerabilidade (de 1 – Muito Baixo a 5 – Extremo) para os anos de 2025, 2050 e 2100. Os dados das subseções estatísticas (BGRI) juntamente com o número de Pessoas Residentes em cada uma delas, foram utilizados aquando do cálculo das áreas de vulnerabilidade costeira para obter uma estimativa realista do número de pessoas que residem (porventura) em áreas consideradas potencialmente vulneráveis.

Os restantes dados, Projeções de sNMM, a Rede Hidrográfica, a Linha de Costa de Portugal Continental, a Carta Litológica de Portugal e a Carta de Ocupação e Uso do Solo (COS2007) serviram de base para o cálculo do modelo do Índice de Vulnerabilidade Costeira proposto.

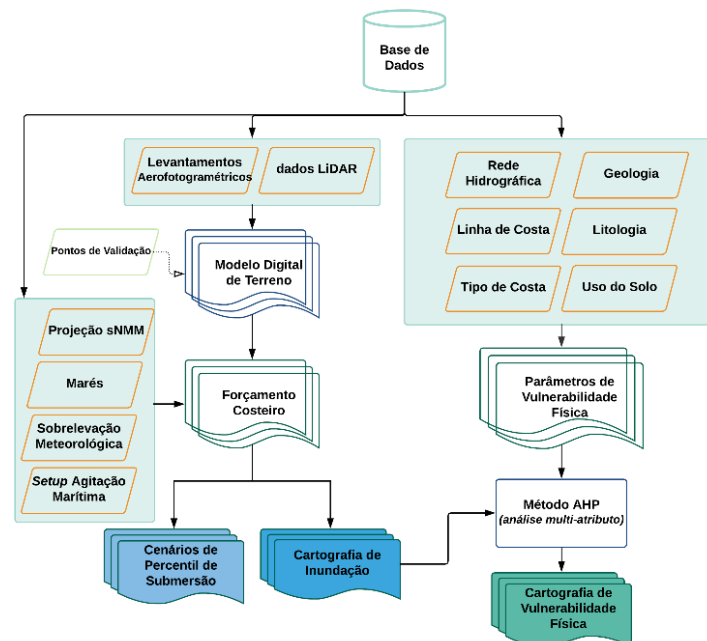


Figura 1 – Fluxo de processos da metodologia para a obtenção da cartografia de inundação e de vulnerabilidade costeira em Portugal Continental

2.1 Cartografia de Vulnerabilidade

2.1.1 – Conceito de Vulnerabilidade

Antes de mais é importante definir o conceito de vulnerabilidade e de risco, uma vez que existem diversas definições que se aplicam consoante o objetivo proposto. Neste projeto adotou-se a definição do IPCC (2014) que define a “*vulnerabilidade das zonas costeiras às ações energéticas do mar como a predisposição a um dado risco, englobando diversos elementos e conceitos, como a sensibilidade ou suscetibilidade ao dano e a falta de capacidade para se adaptar. O risco é definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um acontecimento potencial (indesejado), pela consequência (indesejada) associada a esse acontecimento, resultando assim da interação da vulnerabilidade, exposição e perigo*”.

Porém, é possível identificar zonas costeiras com um elevado índice de vulnerabilidade às ações energéticas do mar, mas sem grandes riscos de exposição. Ou seja, a perda de território desabitado e sem qualquer valor ecológico, cultural ou patrimonial não apresenta elevado risco, apesar de essa situação representar uma perda de território. No entanto, quando vidas humanas, valores patrimoniais e económicos, valores ecológicos e ambientais ou valores culturais estão vulneráveis, as perdas aumentam, aumentando assim o risco de exposição.

2.1.2 – Parâmetros físicos de Vulnerabilidade

A escolha dos parâmetros de vulnerabilidade pode ser complexa e depende muito da análise que se pretenda realizar. Para este trabalho foram selecionados seis parâmetros físicos de vulnerabilidade, para serem avaliados e classificados individualmente, tendo em conta a definição anterior.

Cada um dos fatores foi classificado numa escala de 1 a 5, de modo a expressar o seu contributo para a vulnerabilidade costeira, sendo 5 o nível mais alto e 1 o mais baixo. O Quadro 1 apresenta a classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos selecionados. Em Rocha (2016), descreve-se com maior detalhe os critérios de escolha dos parâmetros de vulnerabilidade utilizados.

Quadro 1 – Classificação dos parâmetros físicos de vulnerabilidade para Portugal Continental

Parâmetros		Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Extremo
		1	2	3	4	5
Rede hidrográfica	Distância à rede	200 m – 300 m	150 m – 200 m	100 m – 150 m	50 m – 100 m	≤ 50 m
	Declive do Terreno	≥ 3°	2.0° – 3.0°	1.5° – 2.0°	0.5° – 1.0°	≤ 0.5°
Tipo de costa		Costa de arriba				Costa baixa e arenosa
Distância à linha de costa		≥ 1000 m	200 m – 1000 m	50 m – 200 m	20 m – 50 m	≤ 20 m
Geologia		Rochas Eruptivas Plutônicas e Vulcânicas		Formação Sedimentares e Metamórficas		Formação Sedimentares
Litologia		urbano; rocha	pedra; argila		praias; depósitos	aluvião; areia solta; cascalhos;
Uso do solo		corpos de água; escassa vegetação; pântano; rocha nua	areias costeiras	floresta	agricultura	infraestruturas urbanas e industriais

2.2 Processo de Análise Hierárquica

Para a criação do Índice de Vulnerabilidade Física Costeira (IVFC) foi utilizado o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty nos anos 70. Este método permite hierarquizar um conjunto de parâmetros avaliados em função de um conjunto de critérios. Como resultado, obtêm-se os pesos dos parâmetros usados na ordenação das alternativas a partir de uma matriz onde o decisor efetua comparações de relação de importância entre pares de critérios característicos das diferentes alternativas. Para cada parâmetro utilizado obtiveram-se os pesos presentes na fórmula (3).

$$IVFC_{ano} = \frac{IPI \times 34\% + RH \times 21\% + TC \times 15\% + DLC \times 15\% + G \times 8\% + L \times 4\% + US \times 2\%}{100\%} \quad (3)$$

onde, **IPI** – Índice de Perigosidade de Inundação, **RH** – Rede Hidrográfica, **TC** – Tipo de Costa, **DLC** – Distância à Linha de Costa, **G** – Geologia, **L** – Litologia e **US** – Uso do Solo.

De realçar, que os resultados do método AHP dependem da perspetiva dos decisores relativamente à importância de cada critério utilizado, sendo que o respetivo resultado depende dos parâmetros de entrada para o modelo. A decisão pode ser feita com base na avaliação de vários decisores, através de uma licitação. No presente caso, foi feita apenas a combinação da avaliação dos autores deste projeto.

3. Resultados

3.1 Cartografia de Vulnerabilidade

3.1.1 – Ano 2050

Para 2050, futuro de médio prazo, com uma subida do NMM segundo a projeção Mod.FC_2 (Antunes *et al.*, 2018) de 44 cm relativamente ao datum vertical de Cascais, estimou-se 903.1 km² de área suscetível de ser vulnerável devido à sNMM, sendo Lisboa o distrito que apresenta a maior área de vulnerabilidade física (221.4 km²), com 92.7% da área classificada com vulnerabilidade alta e extrema, com cerca de 15500 alojamentos e de 24700 residentes nas áreas vulneráveis (Quadro 2).

Quadro 2 – Áreas dos distritos para cada nível do índice de vulnerabilidade física costeira, bem como o número de alojamentos e residentes afetados, para o ano de 2050

Distritos	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Extremo	TOTAL		🏠	👤
	1	2	3	4	5				
Faro	0.06	2.75	11.95	65.2	102.3	182.3	3.6%	15966	15199
Beja	0.01	0.18	1.83	4.36	0.21	6.6	0.1%	27	26
Setúbal	0.05	4.78	17.6	93.9	20.7	136.8	2.6%	5663	8012
Lisboa	0.01	0.53	15.6	151.8	53.5	221.4	7.9%	15499	24682
Santarém	0.00	0.48	15.97	55.1	27.5	99.1	1.5%	668	1095
Leiria	0.15	2.36	7.14	9.96	0.61	20.2	0.6%	734	539
Coimbra	0.01	0.38	5.46	26.3	8.98	41.1	1.0%	1035	1199
Aveiro	0.01	0.65	12.6	55.1	103.1	171.4	6.1%	15828	24081
Porto	0.02	0.26	0.87	1.13	0.26	2.5	0.1%	609	1007
Braga	0.00	0.06	0.71	1.82	1.13	3.7	0.1%	702	847
Viana do Castelo	0.04	0.97	4.67	8.02	4.21	17.9	0.8%	1175	1548
Total	0.4	13.4	94.2	472.6	322.5	903.1	1.9%	49225	63082

Os cortes de pormenor das figuras seguintes permitem identificar a linha do comboio Lisboa - Cascais e a base naval do Alfeite como duas das infraestruturas afetadas pelos cenários de vulnerabilidade. Estes factos devem constituir uma preocupação, dada a sua elevada importância tanto para a cidade de Lisboa como para o apoio operacional da Marinha Portuguesa.



Figura 2 – Corte de pormenor da cidade de Lisboa para o cenário de 2050.



Figura 3 – Corte de pormenor com destaque para a base naval do Alfeite, no cenário de 2050.

3.1.1 – Ano 2100

Em 2100, futuro longo prazo, estima-se uma subida de 1.15 m relativamente ao *datum* vertical de Cascais1938, segundo a projeção Mod.FC_2 (*ibid*), com uma maré em preia-mar máxima sobrelevada e com período de retorno de 100 anos, foi estimada 1146 km² de área, aproximadamente, com probabilidade 99% de vulnerabilidade, sendo que 74.6% dessa área é classificada no nível extremo. O distrito de Lisboa será novamente o mais afetado com 249.6 km² (Figura 5) e um número estimado de 17500 alojamentos e 27800 residentes potencialmente afetados pela sNMM (Quadro 3).

Quadro 3 – Áreas dos distritos para cada nível do índice de vulnerabilidade física costeira, bem como o número de alojamentos e residentes afetados, para o ano de 2100

Distritos	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Extremo	TOTAL		🏠	👤
	1	2	3	4	5				
Faro	0.11	6.60	22.0	76.0	106.1	210.9	4.2%	18463	17575
Beja	0.01	0.42	2.17	4.48	0.21	7.3	0.1%	29	29
Setúbal	0.36	11.0	27.7	111.0	24.1	174.1	3.3%	7208	10198
Lisboa	0.04	1.81	16.0	174.9	56.8	249.6	8.9%	17472	27824
Santarém	0.00	1.84	39.5	83.2	28.4	152.9	2.3%	1031	1690
Leiria	0.38	4.92	13.9	14.1	0.82	34.1	1.0%	1235	908
Coimbra	0.05	1.82	7.65	34.5	10.0	54.0	1.4%	1360	1575
Aveiro	0.01	2.70	31.7	74.1	110.1	218.6	7.8%	20188	30715
Porto	0.07	1.13	2.46	1.61	0.39	5.7	0.2%	1354	2237
Braga	0.00	0.17	2.87	2.99	1.57	7.6	0.3%	1436	1732
Viana do Castelo	0.18	3.29	9.96	12.4	5.22	31.1	1.4%	2037	2685
Total	1.2	35.7	175.9	589.2	343.7	1145.7	2.4%	62453	80034

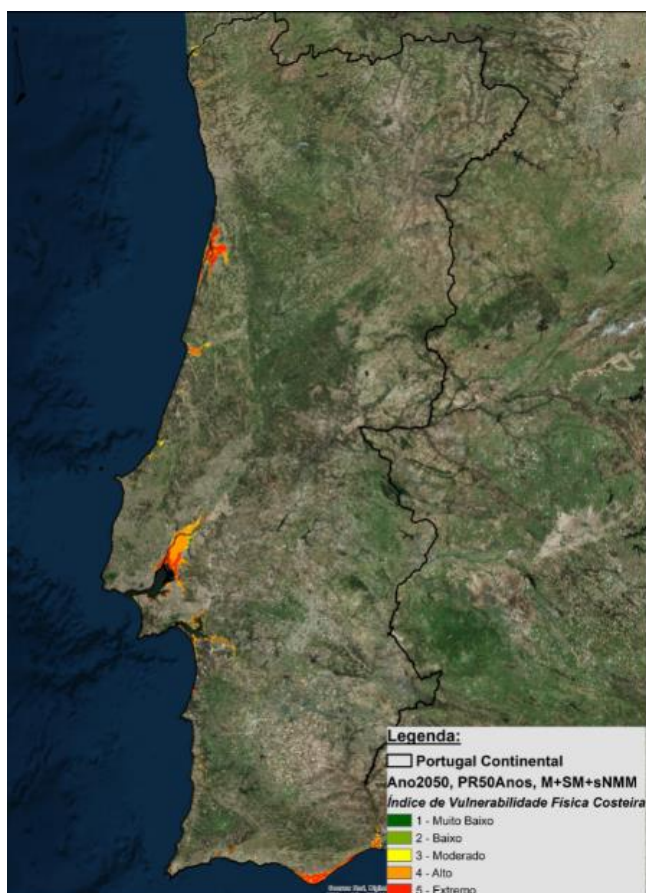


Figura 4 – Cenário de Vulnerabilidade Física Costeira para o ano de 2050 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 50 anos

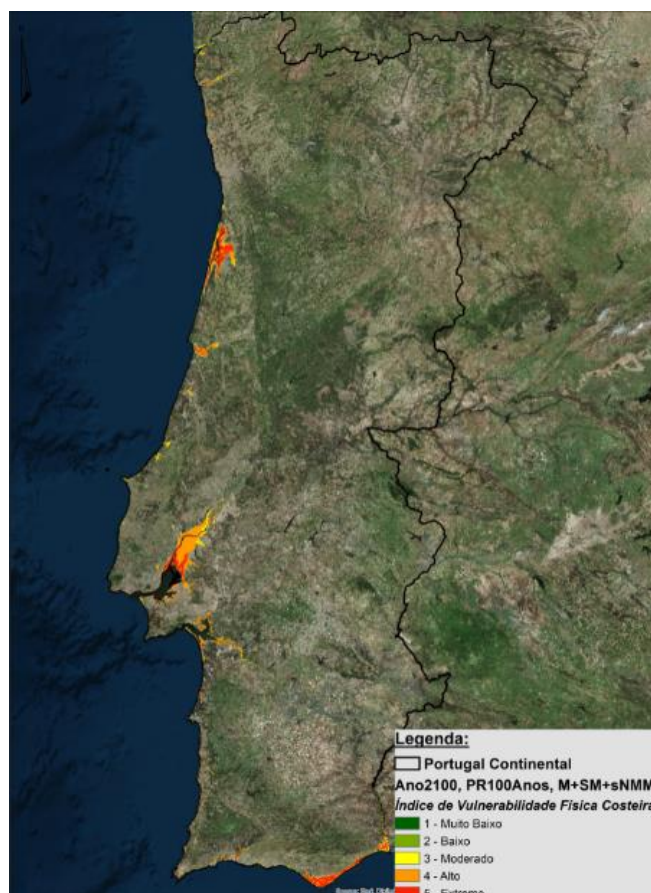


Figura 5 – Cenário de Vulnerabilidade Física Costeira para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 100 anos

Como é notório nos anos anteriores, as zonas de águas interiores são novamente as mais afetadas. Isto é, os distritos que têm grandes estuários vêm a sua área gravemente afetada. É o caso do distrito de Faro e do distrito de Aveiro que são fortemente afetados pela sNMM e consequentemente terão, porventura, grande probabilidade de vulnerabilidade física. A Figura 6 mostra a Ria Formosa, com destaque para o aeroporto internacional de Faro como sendo uma das principais infraestruturas da região e que está classificada como tendo vulnerabilidade alta a extrema. A Figura 7 mostra os alojamentos afetados da zona da Ria de Aveiro, sendo esta uma zona de forte pressão urbana.

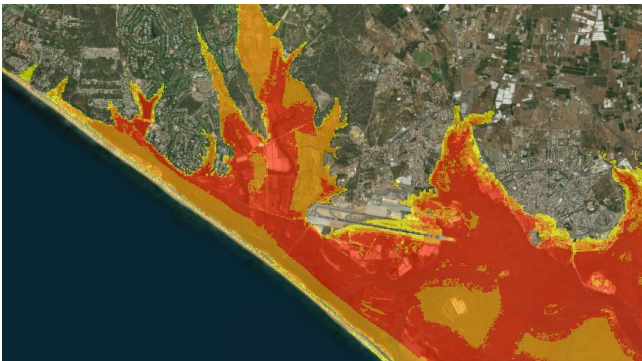


Figura 6 – Corte de pormenor para o cenário de 2100, com destaque para o aeroporto internacional de Faro

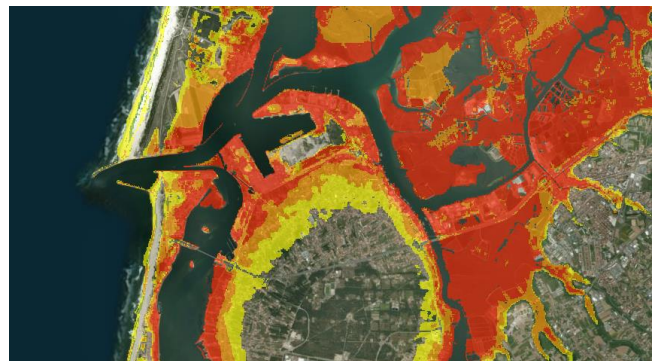


Figura 7 – Corte de pormenor para o cenário de 2100, da Ria de Aveiro

3.2 Aplicação WEB

Com o objetivo de partilhar os resultados deste estudo com o público e disseminar a investigação, foi criada uma aplicação Web (Antunes *et al.*, 2017), alojada no portal SMARTCAMPUS da FCUL (*in* <https://smart.campus.ciencias.ulisboa.pt/portal/home/>) e que recorre à tecnologia ESRI® para a disponibilização de toda a cartografia produzida (Figura 8).

Na aplicação existe o separador, “Sobre a Aplicação”, onde o utilizador é informado do contributo do projeto, de como poderá fazer referência ao mesmo e é alertado para o facto de esta ser uma ferramenta estritamente para navegação e sem quaisquer permissões ou outros fins legais. No portal o utilizador pode ainda obter explicações sucintas da metodologia usada para a obtenção dos cenários de inundação e de vulnerabilidade.

Esta aplicação, interativa, permite ao utilizador consultar os resultados para a cartografia de inundação e de vulnerabilidade de forma isolada (Figura 9), bem como de forma comparativa entre os anos 2025, 2050 e 2100 (Figura 10). Adicionalmente, são ainda fornecidas algumas estatísticas relativas à área vulnerável, ao número de alojamentos e ao número de residentes por distrito afetados em cada um dos cenários (Figura 11).



Figura 8 – Página inicial da aplicação WEB

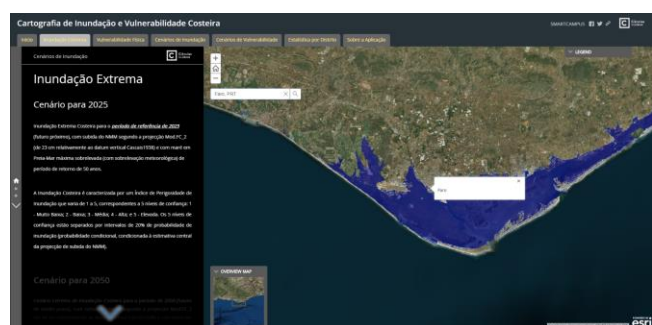


Figura 9 – Cenário de Inundação para o ano de 2025

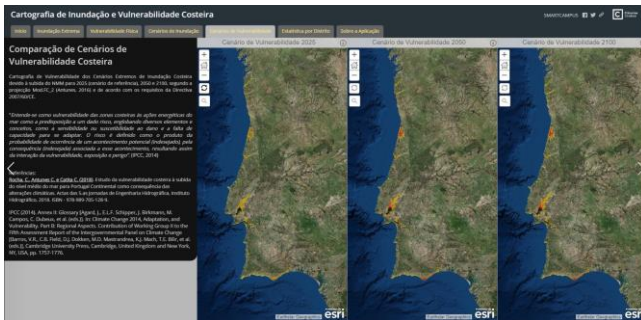


Figura 10 – Análise comparativa do Índice de Vulnerabilidade Física Costeira, para os três horizontes temporais

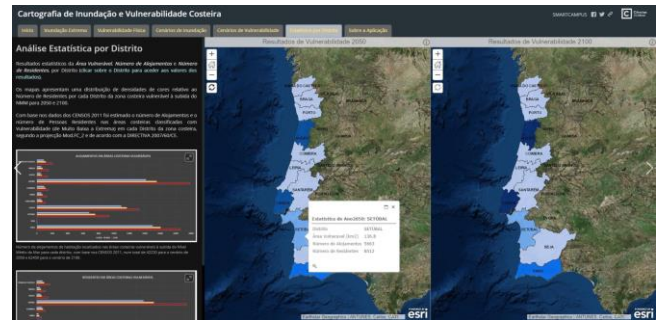


Figura 11 – Análise estatística por distrito para os anos de 2050 e 2100

4. Conclusões

Como resultado deste estudo obtém-se, tanto para 2050 e 2100, uma área costeira com probabilidade de inundação de 903.2 km² e 1146 km², respetivamente. Se contabilizarmos as estimativas para a população residente e os alojamentos, demonstra-se que a avaliação da vulnerabilidade e risco à sNMM e dos eventos extremos de forçamento meteorológico são fundamentais para uma boa e adequada gestão do território no âmbito das medidas de adaptação às alterações climáticas.

O conhecimento antecipado da sNMM, através de modelos de projeção sucessiva e permanentemente atualizados com base nos dados mais recentes, possibilita um planeamento de adaptação antecipado e, conseqüentemente, uma otimização e redução dos custos associados a essa exposição, bem como, uma maior garantia de sustentabilidade económico-social.

Este estudo permitiu alcançar os objetivos inscritos na Diretiva 2007/60/CE, possibilitando a identificação das zonas costeiras vulneráveis à subida do NMM e à ocorrência de eventos extremos, com períodos de retorno até 100 anos. A partir deste estudo estão a ser desenvolvidos outros mais pormenorizados nas áreas identificadas como mais vulneráveis a inundações extremas devido à sNMM, com o objetivo de elaborar a respetiva cartografia de risco.

Referências Bibliográficas

- Antunes, C.; Rocha, C.; Catita, C. (2018). Estudo de avaliação da inundação costeira devido à subida do nível do mar e a níveis extremos de maré. IX Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Lisboa.
- Antunes, C.; Rocha, C.; Catita, C. (2017). Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade Costeira. Portal Smart Campus, FCUL, <http://smart.campus.ciencias.ulisboa.pt>, consultado em Julho de 2018.
- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. Atas das 4^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, Págs.163-166. ISBN - 978-989-705-097-8.
- IPCC (2014). Annex II: Glossary [Agard, J.; Schipper, E.L.F.; Birkmann, J.; Campos, M.; Dubeux, C.; Nojiri, Y.; Olsson, L.; Osman-Elasha, B.; Pelling, M.; Prather, M.J.; Rivera-Ferre, M.G.; Ruppel, O.C.; Sallenger, A.; Smith, K.R.; St. Clair, A.L.; Mach, K.J.; Mastrandrea, M.D.; Bilir, T.E. (eds.)]. In: Climate Change 2014, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Págs. 1757-1776.
- Rocha, C. (2016). Estudo e análise da vulnerabilidade costeira face a cenários de subida do nível do mar e eventos extremos devido ao efeito das alterações climáticas. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/26321>.
- Saaty, R.W. (1987). The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. Math Modelling, Vol. 9, No 3-5, Págs. 161-176.