

# Revista de Gestão Costeira Integrada

## Journal of Integrated Coastal Zone Management

## Indicadores de vulnerabilidade de erosão costeira: Um estudo de caso no Norte de Portugal

Ana Bio<sup>@1</sup>, José Alberto Gonçalves<sup>2</sup>, José Pinho<sup>3</sup>, Luís Vieira<sup>4</sup>, José Vieira<sup>5</sup>,  
Gueorgui Smirnov<sup>6</sup>, Luísa Bastos<sup>7</sup>

*@ Corresponding author: [anabio@ciimar.up.pt](mailto:anabio@ciimar.up.pt)*

<sup>1</sup> CIIMAR – Universidade do Porto

<sup>2</sup> CIIMAR & Fac. Ciências, Universidade do Porto, [jagoncal@fc.up.pt](mailto:jagoncal@fc.up.pt)

<sup>3</sup> Universidade do Minho, [jpinho@civil.uminho.pt](mailto:jpinho@civil.uminho.pt)

<sup>4</sup> Universidade do Minho, [luis.vasquez.vieira@gmail.com](mailto:luis.vasquez.vieira@gmail.com)

<sup>5</sup> Universidade do Minho, [jvieira@civil.uminho.pt](mailto:jvieira@civil.uminho.pt)

<sup>6</sup> Universidade do Minho, [smirnov@math.uminho.pt](mailto:smirnov@math.uminho.pt)

<sup>7</sup> CIIMAR & Fac. Ciências, Universidade do Porto, [lbastos@fc.up.pt](mailto:lbastos@fc.up.pt)

**RESUMO:** A gestão costeira enfrenta grandes desafios relacionados com a crescente vulnerabilidade resultante do impacto de atividades antrópicas como o turismo, urbanização crescente e instalação de infraestruturas, ao que se associa um crescente risco decorrente dos impactos de alterações climáticas. Uma gestão costeira integrada requer, assim, a avaliação da vulnerabilidade e dos riscos costeiros em cenários de alterações climáticas, relacionados com a subida do nível médio do mar ou o aumento de frequência e intensidade de eventos extremos. Neste trabalho apresenta-se a metodologia seguida no âmbito do projeto MarRisk, para a determinação e quantificação de diversos indicadores morfométricos e morfodinâmicos de vulnerabilidade, baseada na classificação de praias e em modelos digitais de terreno e superfície, obtidos a partir de levantamentos de LiDAR e de fotografia aérea, de 2011, 2017 e 2018. Os resultados obtidos para a costa norte de Portugal, entre Espinho e Caminha são apresentados e discutidos. As metodologias aplicadas permitiram obter imagens de elevada resolução (ortofotos) e indicadores morfométricos (posição da linha de praia, largura e volume de praias e dunas, declive da face da praia) e morfodinâmicos (variações da posição da linha de praia e do volume observadas entre levantamentos) para a área de estudo. Observou-se, em média para toda a área de estudo, estabilidade da linha de praia entre 2011 e 2017, mas uma regressão de mais de 17 m entre 2017 e 2018, o que pode, em parte, dever-se a efeitos sazonais. Quanto ao volume do sistema praia/dunas, observou-se uma (aparente) acentuada acreção de 10% entre 2011 e 2017, e erosão de 2% entre 2017 e 2018. Contudo, demonstramos que o modelo digital de terreno obtido a partir do levantamento com LiDAR não é diretamente comparável com os modelos digitais de superfície produzidos no âmbito do projeto, e que o aumento de volume observado é, pelo menos em parte, devido à diferença de metodologias e não a uma real acreção. Sugere-se a implementação de um plano de monitorização preventivo, baseado em métodos normalizados definidos a partir do conhecimento adquirido relativo às dinâmicas instaladas nesta região.

**Palavras-chave:** Vulnerabilidade Costeira, Erosão Costeira, Riscos Costeiros, Morfodinâmica.

**ABSTRACT:** Coastal management is challenging given the increasing vulnerability due to impacts of human activities, like tourism, growing settlements and development of infrastructures, associated with the growing risk of climate change impacts. Integrated Coastal Zone Management thus requires an evaluation of coastal vulnerability and risks for climate change scenarios, which predict sea-level rise and an increase in the frequency and intensity of extreme events. In this work, the methodology used to quantify several morphometric and morphodynamic vulnerability indicators, in the scope of the MarRisk project, is presented. Indicators are determined based on beach classification and on digital terrain and surface models, derived from LiDAR and aerial photography survey data, collected in 2011, 2017 and 2018. Results obtained for the Northern-Portuguese coast are presented and discussed. The applied methodology resulted in high-resolution imagery (orthophotos) and in morphometric (shoreline position, beach and dune width and volume, shoreface slope) and morphodynamic (changes of shoreline position and beach/dune volume between surveys) indicators for the study area. On average, and for the whole area studied, the coastline was stable between 2011 and 2017, but retreated more than 17 m between 2017 and 2018, which can be partly attributed to seasonal effects. The beach/dune volume (apparently) increased by 10% between 2011 and 2017 and decreased by 2% between 2017 and 2018. However, we found that the digital terrain model (DTM) based on the LiDAR data cannot be directly compared to the digital surface models (DSM) obtained during the project, as at least part of the observed increase in volume is due to differences in the method and not to real accretion. The implementation of a preventive monitoring plan is suggested, which should use normalized methods, defined according to the knowledge acquired about the dynamics established in the region.

**Keywords:** Coastal Vulnerability, Coastal Erosion, Coastal Risks, Morphodynamics.

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos indicam que, globalmente, a erosão e a inundação constituem presentemente e no futuro os maiores perigos para as zonas costeiras (Nicholls *et al.*, 2007; Nicholls 2010). Cerca de um quarto da costa arenosa mundial encontra-se em erosão, ameaçando populações e ecossistemas costeiros e causando a perda de território e prejuízos econ micos (Luijendijk 2018). Consequentemente, a erosão costeira e o risco de inundação têm sido uma preocupação crescente dos gestores de zonas costeiras (*e.g.* Neumann *et al.*, 2015; Antonioli *et al.*, 2018; Forzieri *et al.*, 2018; Harrison *et al.*, 2019), particularmente tendo em conta os potenciais efeitos das altera es climáticas (IPCC 2007, 2014). Efeitos previstos, como o aumento do nível médio da água do mar (NMM) e a intensifica o e o aumento de frequência de tempestades, têm o potencial para agravar a situa o já presentemente preocupante (Vitousek *et al.*, 2017). Tendo em conta que um quinto da popula o europeia vive a menos de 10 km de distância da costa (EEA 2006, 2013), muitas vezes em zonas pouco elevadas, estima-se que 13 milhões de pessoas seriam afetadas por um aumento do NMM em 1 m.  , portanto, essencial avaliar vulnerabilidades e entender dinâmicas costeiras, para um processo de decisão e planeamento bem fundamentado e uma gestão integrada sustentável, com aplica o das estratégias de gestão de risco, e das medidas de mitiga o e prote o mais adequadas para a situa o local.

O presente trabalho insere-se no projeto MarRisk (<http://www.poctep.eu/pt-pt/2014-2020/marrisk>) que visa

assegurar um crescimento inteligente e sustentável para zonas costeiras no norte de Portugal e na Galiza, aumentar a resiliência aos potenciais impactos de altera es climáticas e melhorar a resposta a desastres naturais e antrópicos. Neste projeto, vulnerabilidade e riscos costeiros relacionados com as altera es climáticas foram estudados, tendo sido possível definir vários indicadores morfométricos e morfodinâmicos relacionados com a vulnerabilidade costeira face a riscos de erosão, galgamento e inunda o.

A avalia o de riscos costeiros   geralmente baseada em indicadores derivados de caraterísticas físicas, ou morfológicas, do sistema costeiro e dos mecanismos que o afetam, tal como a agita o marítima (Carapu o *et al.*, 2016; Nguyen *et al.*, 2016). Indicadores de vulnerabilidade de erosão e inunda o podem ser morfométricos (baseados em declive, eleva o, largura de praias e dunas, volume sedimentar) e morfodinâmicos (*e.g.*, movimento da linha de costa ou de praia, e balanços sedimentares), refletir outras caraterísticas topográficas (*e.g.*, descontinuidades nas dunas, presença de sistemas fluviais), ou considerar o efeito da vegeta o dunar ou impactos de tempestades (Aucelli *et al.*, 2018; Eichertopf *et al.*, 2019). Ferreira *et al.* (2017), que estudaram os efeitos de tempestades nas zonas costeiras, propõem a utiliza o de indicadores hidrodinâmicos e morfodinâmicos baseados em processos que relacionam o impacto das tempestades com a morfodinâmica costeira, incluindo a dinâmica da linha de costa e das dunas, e a erosão vertical.

Indicadores morfométricos e morfodinâmicos, obtidos a partir de medi es repetidas no terreno, geralmente em

perfis perpendiculares à costa (Eichentopf *et al.*, 2019; Jimenez *et al.*, 2016), são atualmente fáceis de obter. Com o desenvolvimento de técnicas de deteção remota, a observação e caracterização de áreas costeiras tornou-se muito mais abrangente e eficiente. Levantamentos com sensores óticos, através de fotografia aérea (Aucelli *et al.*, 2018; Johnson *et al.*, 2015; Gonçalves *et al.*, 2018) ou sistemas terrestres (Bio *et al.*, 2015), ou por radar (LiDAR) (*e.g.* Antonioli *et al.*, 2017; Nijland *et al.*, 2017; Mauff *et al.*, 2018), a partir de satélites, aviões ou drones, permitem obter modelos (de menor ou maior resolução) para toda a morfologia da praia. Isso facilita a monitorização, ou seja, a obtenção de séries temporais de observações necessárias para a avaliação da dinâmica instalada.

No presente estudo analisaram-se dados de um levantamento nacional aéreo com sensor LiDAR (de 2011) e de dois levantamentos regionais de fotografia aérea (2017 e 2018). O objetivo foi estabelecer uma metodologia para a extração e quantificação de indicadores morfométricos e morfodinâmicos a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de Superfície (MDS) e avaliar a aplicabilidade e possíveis limitações no uso desses dados. O trabalho focou-se em indicadores de erosão baseados na linha de praia e no volume sedimentar das praias no Norte de Portugal.

## **2. ÁREA DE ESTUDO**

O presente trabalho incidiu sobre a costa Atlântica entre Espinho e Caminha, no norte de Portugal (Fig. 1), com uma extensão de cerca de 90 km. A costa Norte-Atlântica Portuguesa apresenta uma morfologia dinâmica, sobretudo devido ao clima oceânico altamente energético, com alturas de onda significativa ao largo entre 2 m e 3 m, e períodos de onda entre 8 s e 12 s. A morfologia é ainda localmente afetada por intervenções humanas, incluindo urbanizações e estruturas de proteção costeira (esporões e quebra-mares) que alteram as correntes e a direção das ondas incidentes, gerando padrões locais de erosão ou acreção. A zona estudada apresenta tipologias de costa variadas, incluindo alguns trechos altamente dinâmicos e vulneráveis à erosão (*e.g.*, Moledo, Vila Praia de Âncora, Amorosa, Rio de Moinhos, Esposende, Ofir e Vila Chã).

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Levantamentos e Modelos Digitais**

Foram realizados dois levantamentos baseados em fotografia aérea, um em Novembro de 2017 e outro em Maio de 2018. Os levantamentos foram efetuados a partir de uma pequena aeronave, equipada com uma

câmara digital fotogramétrica de alta resolução (Vexcel UltraCam Falcon, 9420×14430 pixéis), com voos a cerca de 1900 m de altitude, ao longo da costa norte-portuguesa entre Gaia e Caminha (ca. 77 km) em 2017 e entre Espinho e Caminha (ca. 90 km) em 2018, cobrindo uma faixa terrestre de aproximadamente 1 km de largura (Fig. 1). A essa altitude a resolução (tamanho do pixel) no terreno é de aproximadamente 13 cm. As fotografias foram recolhidas numa faixa única, com sobreposição de 80%, de modo a permitir a análise fotogramétrica e a extração do Modelo Digital de Superfície (MDS) (Gonçalves *et al.*, 2018).

As imagens foram diretamente georreferenciadas a partir do sistema GNSS/INS a bordo da aeronave, utilizando-se para as observações GNSS o modo de posicionamento relativo em pós-processamento. Para cada fotografia a posição do centro de projeção da câmara e os ângulos atitudinais (inclinações nos três planos) foram registados. Apesar da elevada precisão dessa informação, foram utilizados também alguns pontos de apoio levantados no terreno, sobretudo em zonas urbanas, que foram utilizados para recalcular os parâmetros da orientação externa das fotografias aéreas, corrigindo tendências sistemáticas, sobretudo nos ângulos de atitude (Gonçalves *et al.*, 2011).

MDS com 0,5 m de resolução foram obtidos automaticamente, a partir de imagens sobrepostas, com base em pontos correlacionados, usando o *software* Agisoft Photoscan (Agisoft 2018) (Fig. 2). É habitual aplicar-se uma filtragem ao MDS, de forma a transformá-lo num modelo digital do terreno (MDT), mas uma vez que nos locais em estudo praticamente não existe vegetação ou edificado, optou-se por não o fazer, mantendo-se assim o MDS. Criaram-se, ainda, ortomosaicos das fotografias aéreas, com uma resolução no terreno normalizada para 12,5 cm.

A fim de avaliar a morfodinâmica de médio prazo, analisou-se também o Modelo Digital de Terreno (MDT) obtido a partir do levantamento nacional efetuado com tecnologia LiDAR em Novembro/Dezembro de 2011 (DGT 2018), numa parceria entre o Instituto Geográfico Português (IGP), Direção-Geral do Território (DGT), e o INAG (Instituto da Água, I. P.), e disponibilizado com uma resolução de 1 m numa faixa costeira terrestre de 600 m de largura (Fig. 2). Este modelo foi validado, tendo, de acordo com os autores (APA, I. P. e DGT), um erro médio quadrático de 0,154 m, com 90% dos pontos de controlo a apresentarem um desvio <0,26 m.

### **3.2 Indicadores**

Com base nas fotografias aéreas, delimitou-se a área de estudo, incluindo apenas a parte emersa da costa,

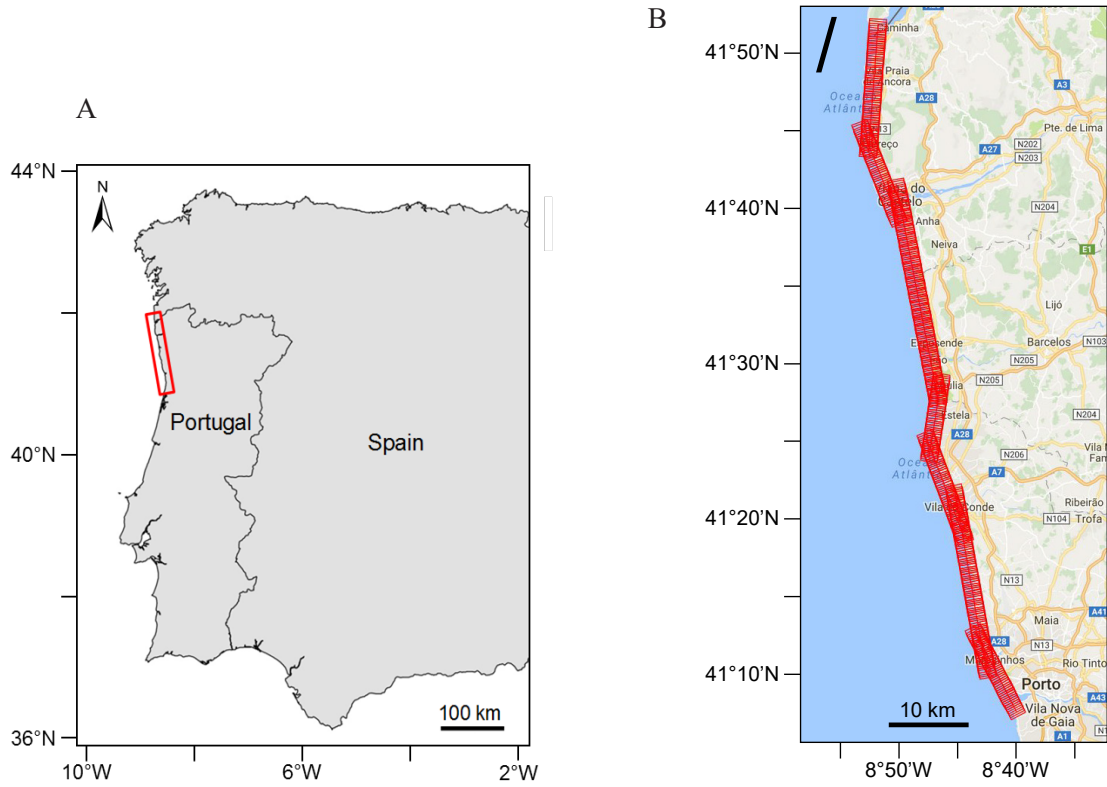


Figura 1. Localização da área de estudo no norte de Portugal (A) e plano de voo do levantamento de Novembro de 2017 (B).

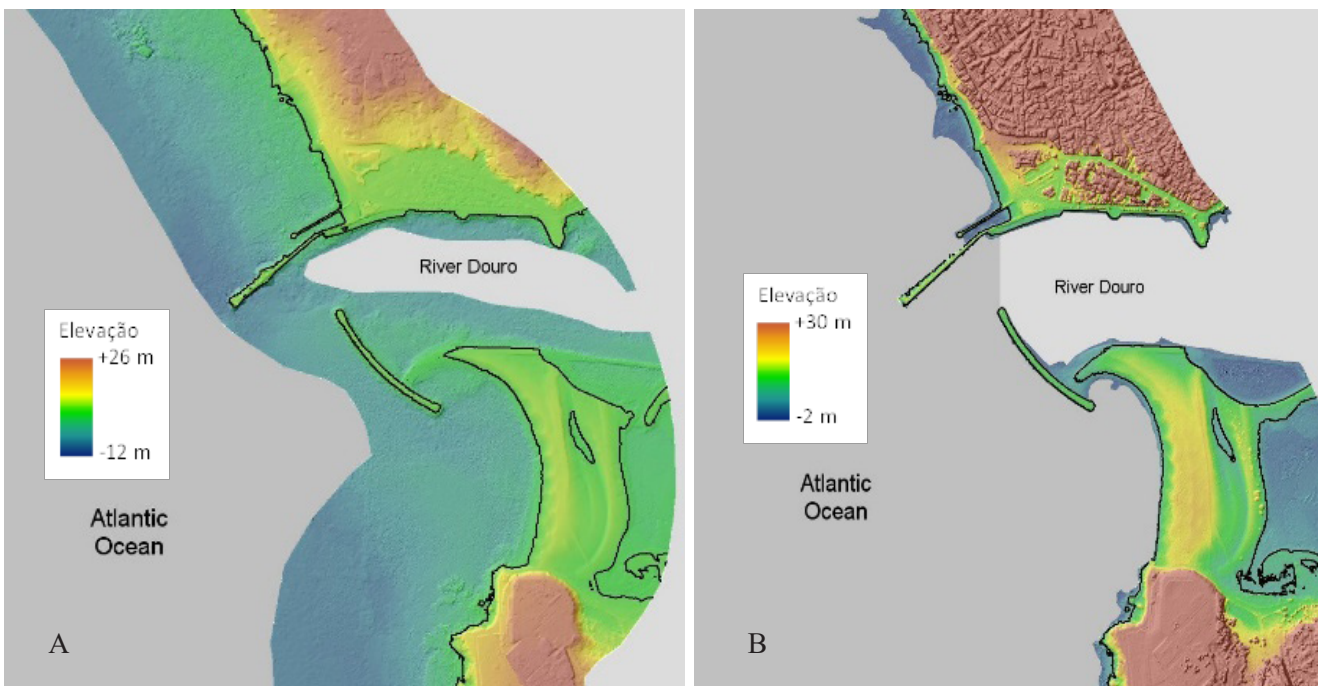


Figura 2. Exemplos do MDT obtido com LiDAR em 2011 (A) e do MDS obtido em 2017 (B), com elevação referente ao NMM.

nomeadamente praias e sistemas dunares. A fim de distinguir entre trechos mais ou menos vulneráveis nas várias divisões administrativas, a costa foi previamente caracterizada, com observações *in situ* e a partir de imagens aéreas (ortomosaicos), e dividida em segmentos delimitados pelas freguesias e de acordo com as tipologias de costa identificadas na área de estudo. Delimitaram-se, assim, diferentes segmentos: totalmente rochosos, seguidamente considerados como sendo do Tipo 1; arenosos com afloramentos rochosos, Tipo 2; compostos por praias de seixo com presença de afloramentos rochosos, Tipo 3; e predominantemente arenosos, Tipo 4. Obtiveram-se 87 segmentos comuns aos três levantamentos, 21 do Tipo 1, 41 do Tipo 2, 3 do Tipo 3 e 22 do Tipo 4, distribuídos por 34 freguesias.

No âmbito do projeto MarRisk consideraram-se vários indicadores relacionados com a vulnerabilidade e os riscos de erosão, galgamento e inundação costeiros, definidos a partir da geomorfologia, da ocupação do terreno (incluindo a vegetação dunar, ou falta dela, áreas cultivadas, florestadas ou urbanizadas) e intervenções humanas, tais como estruturas de proteção e defesa (*e.g.*, molhes, quebra-mares e enrocamentos). Este trabalho foca-se apenas nos seguintes indicadores morfométricos e morfodinâmicos: posição da linha de praia e sua dinâmica; volume da duna e da praia e sua dinâmica; e declive da face da praia. Os indicadores foram extraídos do MDT (2011) e dos MDS (2017 e 2018), num Sistema de Informação Geográfica (SIG) construído para o efeito recorrendo ao programa ArcGIS versão 10.6.1. Todas as análises foram realizadas de modo agregado para a área de estudo e para os segmentos determinados pelas 34 freguesias abrangidas e os 4 tipos de costa considerados.

Como *proxy* para a linha de praia, considerou-se a cota de 1,05 m acima do nível médio do mar (NMM de Cascais 1938), correspondente ao nível médio de preia-mar em marés vivas (calculado com base numa série temporal de 19 anos de dados do marégrafo de Aveiro; Lopes 2016). Para determinar o avanço ou recuo da linha de praia, calculou-se a distância média entre linhas de praia obtidas para os diferentes levantamentos, nos diferentes segmentos da área de estudo. A deslocação dessa linha foi determinada calculando as áreas entre linhas de levantamentos sucessivos, consideradas negativas se representarem uma regressão e positivas se representarem um avanço em direção ao mar, e dividindo essas áreas pelo comprimento médio das linhas. Obtiveram-se assim para cada segmento distâncias médias entre linhas, que constituem estimativas do avanço ou recuo da linha de praia entre levantamentos.

A linha de praia foi também utilizada para a determinação da orientação de cada segmento. Este indicador é

importante para a avaliação do impacto da agitação marítima, correntes costeiras e a ação do vento nas praias arenosas, sendo ainda útil para a definição de perfis perpendiculares à costa em cada segmento. A linha de praia extraída de cada um dos MDS foi simplificada usando o algoritmo de Douglas-Peucker (ArcGIS Cartography Tools), com tolerância máxima de 25 m. Visto que a orientação da praia pode oscilar ao longo do tempo, a orientação dos segmentos e a consequente localização dos perfis perpendiculares foram apenas definidos a partir dos dados do levantamento de 2011, mantendo-se nas análises realizadas para os levantamentos posteriores. Traçou-se um perfil central em cada segmento, perpendicular à costa, e calculou-se o declive da praia adotando-se um modelo linear para os valores observados entre as cotas de 2 m e 4 m (considerou-se, em função dos perfis obtidos, que estas cotas delimitam em regra a face de praia nesta região).

A largura da praia e o volume foram calculados a partir do MDT e dos MDS. A erosão ou acreção foi determinada pela diferença entre volumes de levantamentos sucessivos.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A segmentação da costa de acordo com o tipo de costa e a freguesia produziu 87 segmentos de dimensões variadas, com comprimentos entre 18 m e 5332 m, e larguras médias, para o sistema de praia e dunas acima da cota de 1,05 m, entre 5 m e 407 m. Os cálculos para avaliar a morfodinâmica foram, portanto, efetuados de forma ponderada. O movimento médio da linha de praia foi ponderado relativamente ao comprimento dos segmentos (*i.e.*, o comprimento da linha de praia de cada segmento). A variação do volume foi calculada por metro linear de linha de praia, e as médias foram ponderadas relativamente ao comprimento dos segmentos.

### **4.1 Linha de praia**

A extração de indicadores a partir dos modelos digitais de elevação ou terreno revelou-se por vezes difícil. Assim há muitos trechos em que uma extração automática da linha de praia se torna impossível, devido aos afloramentos rochosos, que produzem isolinhas extremamente fragmentadas para a cota pretendida (Fig. 3 A). Mas, mesmo em zonas arenosas, onde a topografia é menos acidentada, a linha teria que ser muito simplificada para eliminar as variações de pequena escala (Fig. 3 B) e possibilitar uma análise da dinâmica entre levantamentos, perdendo por vezes o traçado característico do trecho costeiro em causa. Depois de vários ensaios e testes com os algoritmos de simplificação automática disponíveis no *software* ArcGIS optou-se por traçar a linha de

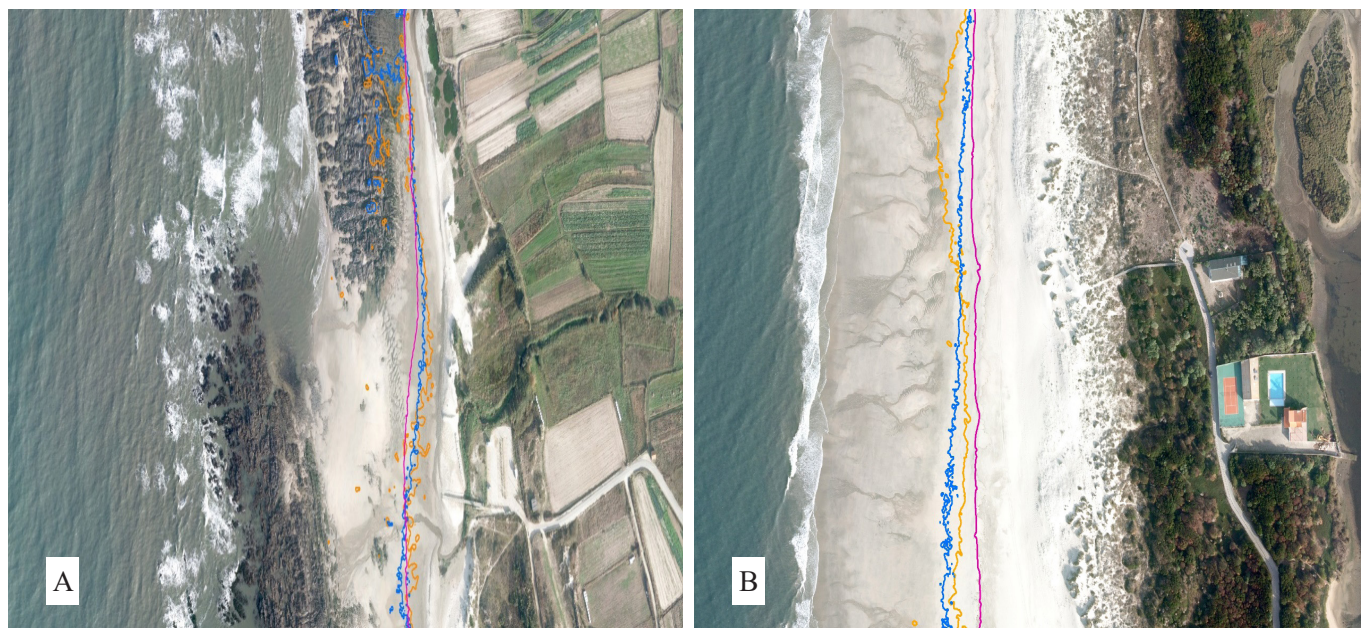


Figura 3. Isolinhas à cota de 1,05 m acima do NMM, num trecho de praia com afloramentos rochosos (A) e num trecho arenoso (B). A ortofoto é de Novembro de 2017, as isolinhas representantes da linha de praia foram extraída do MDT obtido com LiDAR (magenta) e dos MDS obtidos a partir de fotografias aéreas de 2017 (azul) e de 2018 (laranja).

praia manualmente, seguindo a isolinha de 1,05 m mais contínua (Fig. 4). A linha de praia correspondente ao MDT de 2011 foi subsequentemente simplificada (aplicando o algoritmo de Douglas-Peucker) para determinar a orientação de cada segmento e a localização do perfil perpendicular.

Em média, observou-se estabilidade da linha de praia entre 2011 e 2017 e uma regressão de 1,53 m entre 2017 e 2018 (Tabela 1). Estas dinâmicas poderão ser explicadas pelas escalas temporais e pela sazonalidade característica da dinâmica costeira. As observações de 2011 (LiDAR) e 2017 (fotografia) foram ambas realizadas no início do inverno, pelo que as diferenças sazonais nestas duas linhas poderão ser negligenciáveis. Assim, observa-se uma estabilidade temporária neste período (6 anos). Contudo, entre Novembro de 2017 e Maio de 2018, a costa esteve sujeita a agitação marítima mais energética, que se reflete normalmente em transporte transversal de sedimentos da praia emersa para a praia imersa. É, portanto, provável, que a regressão da linha de praia observada seja em parte devida a fenómenos sazonais e que a costa tenha recuperado (pelo menos parcialmente) nos meses seguintes. Entre Novembro de 2017 e Maio de 2018 observaram-se perdas em todos os tipos de costa analisados, sendo as costas arenosas as que sofreram maiores perdas, regredindo em média 3,94 m, e as rochosas e arenosas com afloramentos rochosos as menos afetadas (Tabela 1) como expectável. Note-se que, entre 2011 e 2017, apesar da dominância de segmentos com

progressão da linha de praia em direção ao mar e um movimento médio quase nulo, as praias rochosas e de seixos com afloramentos rochosos apresentaram, em média, recuos na linha de praia. Para as praias rochosas, este facto resulta de alguns segmentos de elevada extensão com recuos acentuados pesarem de forma acentuada na média obtida para esses tipos de costa. Dos 8 segmentos rochosos em regressão, com uma extensão total de 5,4 km, dois segmentos com 1,9 e 1,7 km de comprimento apresentaram regressões de 13 m e 16 m, respetivamente. Nas praias de seixos com afloramentos rochosos, a linha de praia de um segmento recuou mais de 5 m enquanto os outros dois avançaram apenas 0,6 m. Na Figura 5 representa-se a dinâmica da linha de praia entre levantamentos realizados. Por segmento, o movimento da linha de praia apresentou valores de -17,3 m (regressão) a 24,7 m (progressão), entre Nov./Dez. 2011 e Nov. 2017, e de -24,8 m e 20,9 m, entre Nov. 2017 e Maio 2018. Muitos segmentos apresentam tendências opostas para os dois períodos estudados.

#### 4.2 Volumetria

Visto que os MDS apresentavam áreas mal definidas (causadas por afloramentos rochosos e ondas em rebentação) nas zonas abaixo de 1 m NMM, optou-se por considerar apenas a área com cotas superiores a 1 m para o cálculo dos volumes. Tal como referido, e a fim de obter parâmetros comparáveis, os volumes e diferenças entre volumes foram analisados por metro linear de linha de praia.

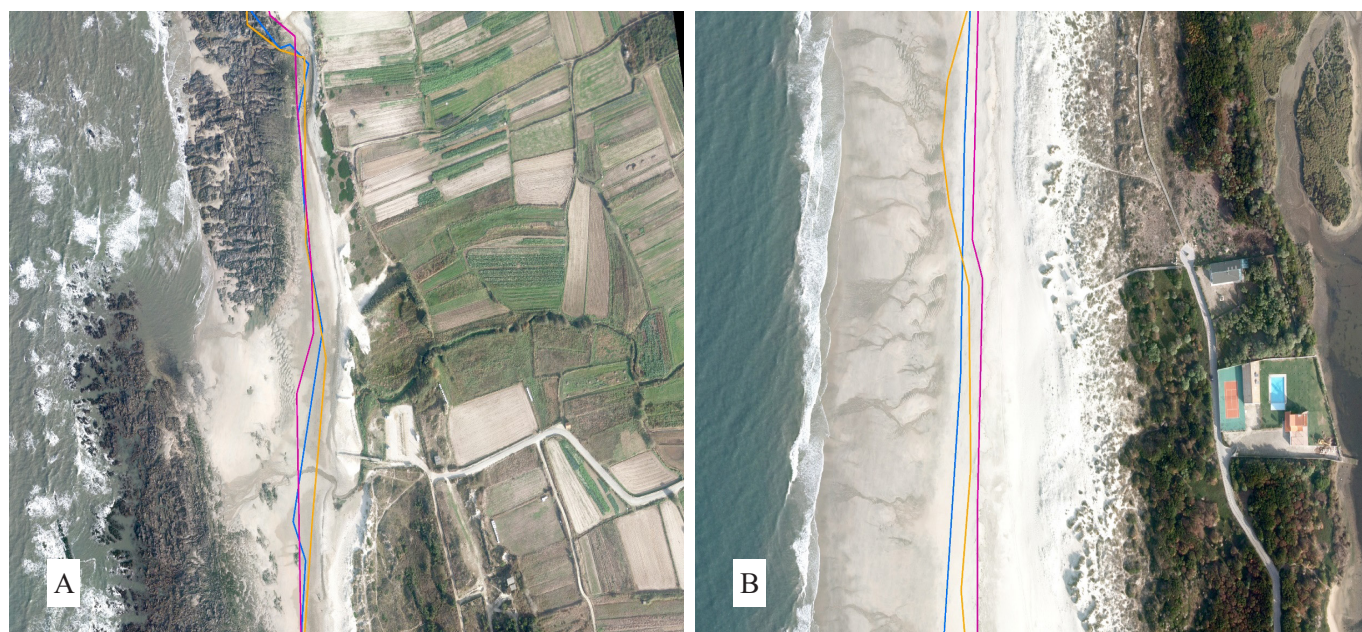


Figura 4. Isolinhas à cota de 1,05 m acima do NMM simplificadas, num trecho de praia com afloramentos rochosos (A) e num trecho arenoso (B). A ortofoto é de Novembro de 2017, as isolinhas foram extraída do MDT obtido com LiDAR (magenta) e dos MDS obtidos a partir de fotografias aéreas de 2017 (azul) e de 2018 (laranja).

Tabela 1. Variações da linha de praia entre levantamentos, para a área de estudo de forma agregada e por tipologia de costa, com apresentação do número de segmentos (#), da percentagem de segmentos que avançaram ou recuaram entre 2011 e Novembro de 2017 e entre Novembro de 2017 e Maio de 2018, e da média ponderada (pelo comprimento de cada segmento) do movimento em direção ao mar (valores positivos).

Tipologia de segmentos costeiros	#	2011 a Nov. 2017			Nov. 2017 a Maio 2018		
		Avanço	Recuo	Média (m)	Avanço	Recuo	Média (m)
Agregada	87	<b>59%</b>	41%	<b>0,02</b>	38%	<b>62%</b>	-1,53
Rochosos	21	<b>62%</b>	38%	-0,77	43%	<b>57%</b>	-0,27
Arenosos com rochas	41	<b>63%</b>	37%	<b>0,04</b>	44%	<b>56%</b>	-0,73
Seixos com rochas	3	<b>67%</b>	33%	-0,22	33%	<b>67%</b>	-1,61
Arenosos	22	<b>45%</b>	55%	<b>0,50</b>	23%	<b>77%</b>	-3,94

Em termos de volume, observou-se um aumento acentuado entre 2011 e 2017. Em média, o volume aumentou 71,2 m<sup>3</sup> por metro linear de costa entre 2011 e 2017 e diminuiu 17,1 m<sup>3</sup> por metro linear de costa entre 2017 e 2018 (Tabela 2). Foram novamente as praias arenosas as mais dinâmicas, com uma acreção média superior a 100 m<sup>3</sup>/m, entre 2011 e 2017, e com perda média de mais de 43 m<sup>3</sup>/m, entre 2017 e 2018. Por segmento, a diferença de volume entre observações variou de 108,6 m<sup>3</sup>/m a 2035,2 m<sup>3</sup>/m, entre Nov./Dez. 2011 e Nov. 2017, e de -372,3 m<sup>3</sup>/m a 85,3 m<sup>3</sup>/m, entre Nov. 2017 e Maio 2018 (Fig. 5). Tal como para a linha de praia, muitos segmentos apresentam em termos de volumetria tendências opostas para os dois períodos estudados.

Considerando a área de estudo de modo agregado, o volume aumentou mais de 6 milhões de metros cúbicos entre 2011 e 2017, o que corresponde a 9,7% do volume

do sistema praia/dunas acima do NMM. Esse aumento acentuado, verificou-se sobretudo nas praias arenosas e, surpreendentemente, também nas praias rochosas (Tabela 2). Tendo em conta que as praias rochosas são supostamente as mais estáveis e que no terreno não verificámos uma maior cobertura das rochas com areia, os MDT/MDS foram analisados em mais detalhe. Verificou-se que parte do (aparente) aumento de volume não está relacionado com acreção de sedimentos, mas sim com vegetação. O MDT de 2011 foi obtido a partir de dados medidos com o LiDAR, um método capaz de penetrar a vegetação e detetar a superfície do terreno, e sujeitos a uma filtragem e correção em que estruturas, tais como edificado e vegetação, foram eliminadas do modelo. De facto, observamos que muitos dos segmentos que mais ganharam em volume entre 2011 e 2017 são segmentos com dunas arborizadas (Fig. 6). O facto de o DEM de 2017 considerar o volume dessa

vegetação explica por si só um aumento do volume. Imagens de 2010 (GoogleEarth) mostram que nessa data já existia vegetação abundante, embora menos desenvolvida do que nos anos 2017 e 2018. Note-se que também encontramos zonas com perda de volume da vegetação entre 2017 e 2018, o que indica que nem toda a aparente perda de volume observada nesse período, que totaliza mais de 2%, representa erosão (Fig. 7). Contudo encontram-se também diferenças entre 2011 e 2017 nas áreas rochosas. O MDT é suavizado nessas zonas, sugerindo um processamento da imagem do LiDAR que “filtrou” parte dos afloramentos rochosos (Fig. 8).

### 4.3 Declive

Nos resultados obtidos, em conformidade com a metodologia descrita para a caracterização dos declives de praia, verificou-se uma diversidade de declives em alguns segmentos mais longos. Optou-se por considerar na análise realizada o declive observado no perfil central de cada segmento. Uma vez que a morfologia das praias não apresenta uma face claramente delimitada, consideraram-se, para efeito de quantificação dos declives, cotas fixas, assumindo que aqueles correspondem ao declive medido em cada perfil entre os pontos de cota 2 m e cota 4 m (Fig. 9). Os declives apresentaram valores entre 5% (3°) e 68% (31°), sendo mais acentuados nos segmentos rochosos (7-61%), seguidos dos segmentos arenosos com afloramentos rochosos (4-36%), dos arenosos (5-26%) e dos três de seixos com afloramentos rochosos (9-21%). Para cada segmento, os declives variaram pouco entre os levantamentos analisados (tal como no exemplo da Fig. 9).

## 5. CONCLUSÕES

As metodologias apresentadas permitiram quantificar indicadores, ou parâmetros para posterior quantificação de indicadores deles derivados, de vulnerabilidade à erosão costeira, a partir de modelos da morfologia das praias e dunas, que podem ser usados para análises de

risco e no apoio à gestão integrada das zonas costeiras. Estes resultados são essenciais para a tomada de medidas adequadas de proteção e mitigação dos efeitos dos riscos costeiros, incluindo potenciais efeitos de alterações climáticas. Numa fase posterior pretende-se avaliar a capacidade dos parâmetros estudados para se constituírem como indicadores de vulnerabilidade à erosão, e procurar obter índices derivados da respetiva agregação para caracterização dos diferentes segmentos costeiros (e.g., Aucelli *et al.*, 2018).

Verificou-se que a quantificação de indicadores morfométricos e morfodinâmicos nem sempre é fácil e direta. Em sistemas complexos como as zonas costeiras, e em sistemas naturais em geral, é preciso trabalhar com simplificações e pressupostos, ignorando particularidades locais que podem ter grande impacto na vulnerabilidade costeira à erosão, galgamento e inundação.

Verificou-se também que modelos de terreno obtidos com metodologias diferentes podem não ser diretamente comparáveis, se não representarem as particularidades locais da mesma forma. Isso tem, sobretudo, implicações para estudos da dinâmica costeira de médio e longo prazo. No presente caso, poder-se-ia aplicar um filtro para remover a vegetação dos MDS de 2017 e 2018, convertendo-os em MDT, para depois se poderem comparar com o MDT de 2011. Contudo, os algoritmos para a filtração de objetos do software utilizado funcionam bem em zonas arenosas, filtrando pessoas a caminhar na praia ou gaiivotas, mas mal em zonas arborizadas (como algumas dunas da área de estudo). Os resultados não são portanto comparáveis com os do LiDAR, cujo radar tem um grau de penetração que permite observar o terreno em zonas arborizadas.

Uma avaliação adequada da morfodinâmica requer uma série temporal extensa de levantamentos consistentes e comparáveis (de preferência normalizados), o que reforça a necessidade da implementação de planos de monitorização costeira, de apoio à gestão integrada e sustentável das zonas costeiras. Em tempos de grande incerteza sobre a segurança e sustentabilidade das zonas costeiras face às alterações climáticas, a implementação de

Tabela 2. Variações de volume entre levantamentos, para a área de estudo, de forma agregada e por tipologia de costa, com apresentação do número de segmentos (#), da percentagem de segmentos que aumentaram ou diminuíram de volume, entre 2011 e Novembro de 2017 e entre Novembro de 2017 e Maio de 2018, e da variação por metro linear.

Tipologia de segmentos costeiros	#	2011 a Nov. 2017			Nov. 2017 a Maio 2018		
		Acreção	Erosão	Média (m <sup>3</sup> /m)	Acreção	Erosão	Média (m <sup>3</sup> /m)
Agregada	87	<b>80%</b>	20%	<b>71,20</b>	38%	<b>62%</b>	-17,14
Rochosos	21	<b>95%</b>	5%	<b>93,65</b>	40%	<b>60%</b>	-6,12
Arenosos com rochas	41	<b>78%</b>	22%	<b>55,73</b>	44%	<b>56%</b>	-9,56
Seixo com rochas	3	<b>67%</b>	33%	<b>22,20</b>	<b>67%</b>	33%	-1,54
Arenosos	22	<b>73%</b>	27%	<b>100,90</b>	23%	<b>77%</b>	-43,13



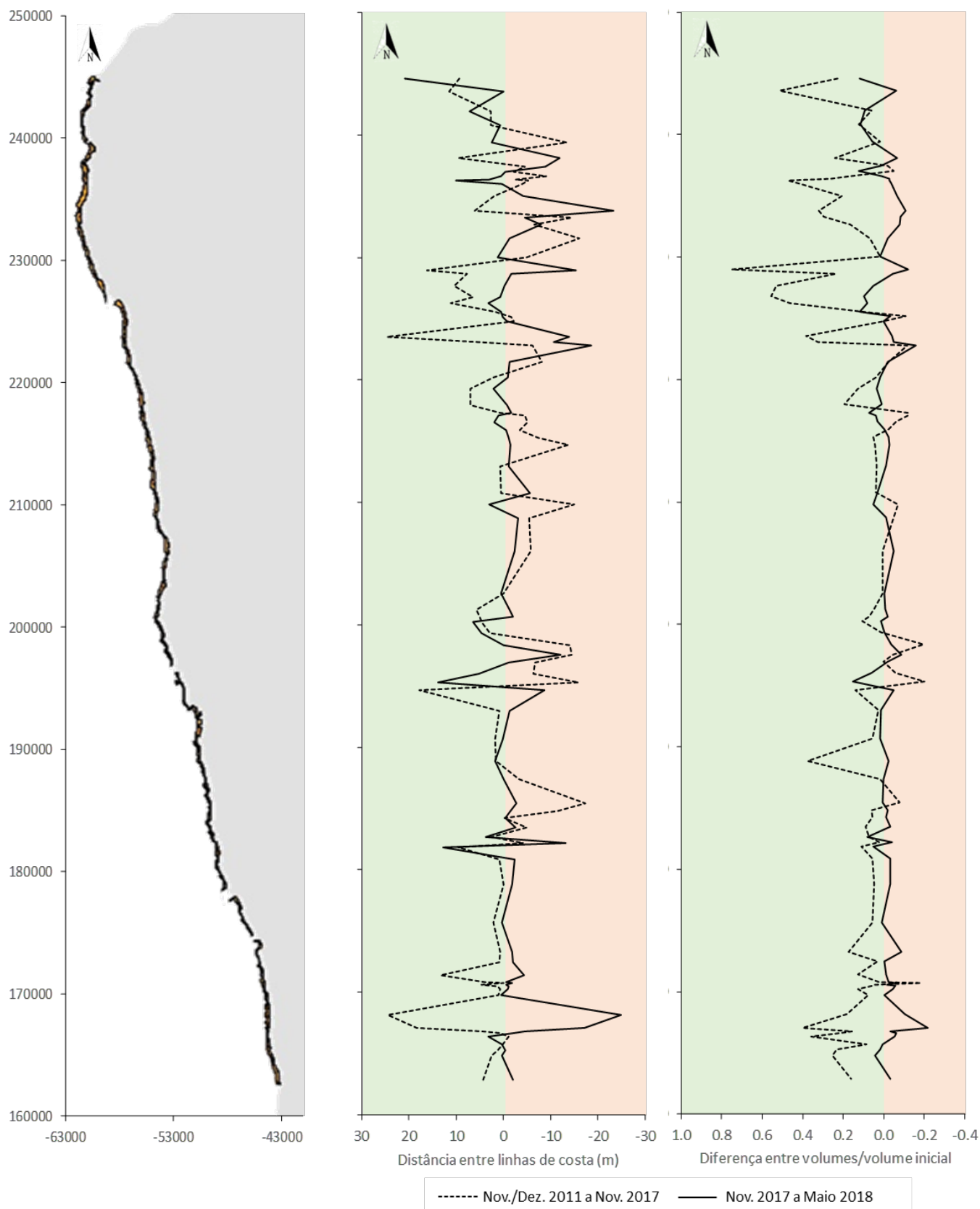


Figura 5. Morfodinâmica observada ao longo da costa: faixa costeira apresentada em coordenadas planas (ETRS98 Portugal TM06) (A); distância média entre linhas de praia (B) e diferença em volume (C), observadas entre Nov./Dez. 2011 e Nov. 2017 e entre Nov. 2017 e Maio 2018, por segmento, apresentada em relação à latitude central de cada segmento.

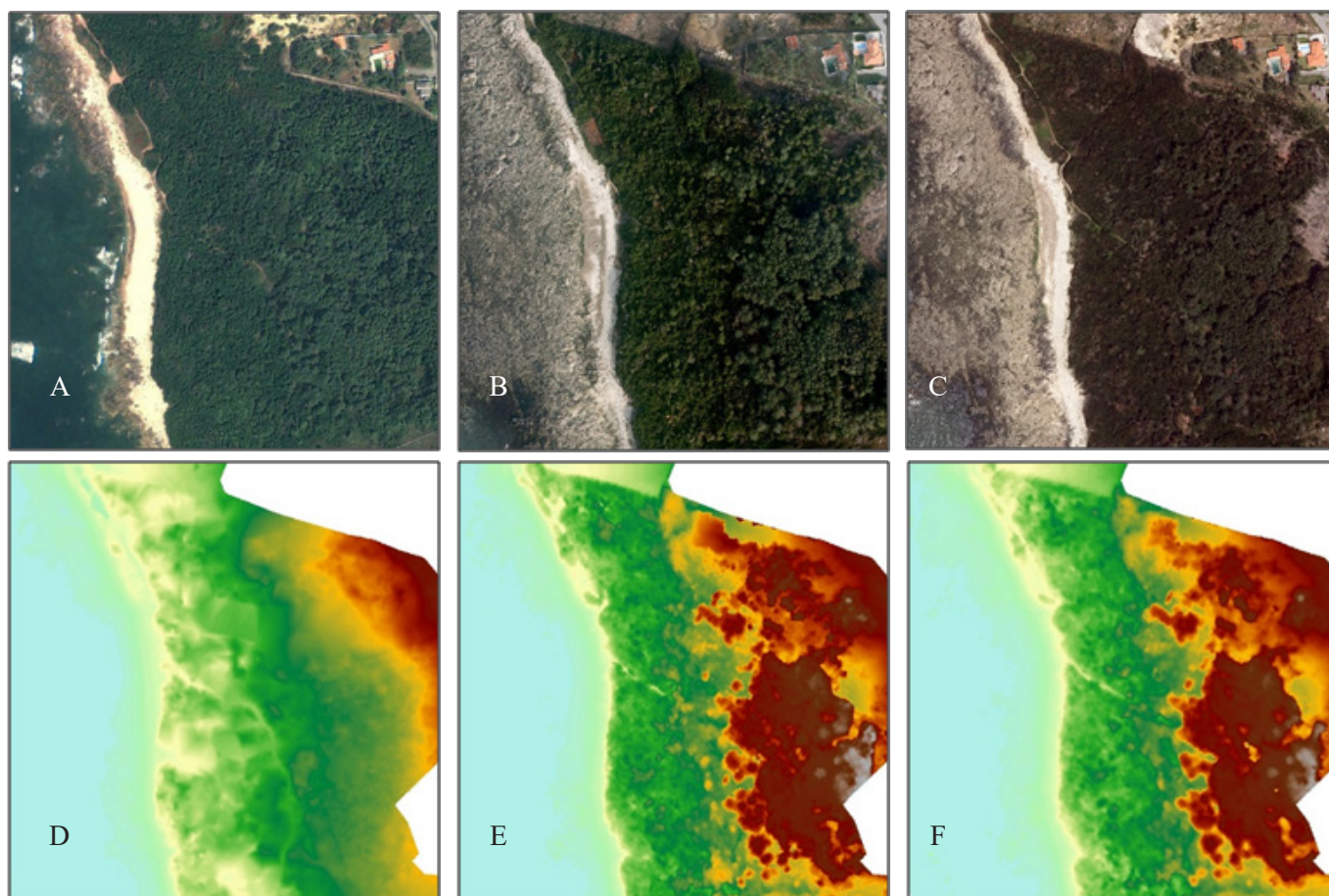


Figura 6. Pormenor da área de estudo com cobertura vegetal: ortofotos obtidos em Setembro de 2010 (GoogleEarth) (A), Novembro de 2017 (B) e Maio de 2018 (C), MDT de 2011 (D), MDS de 2017 (E) e MDS de 2018 (F) (modelos com a mesma escala de cor).

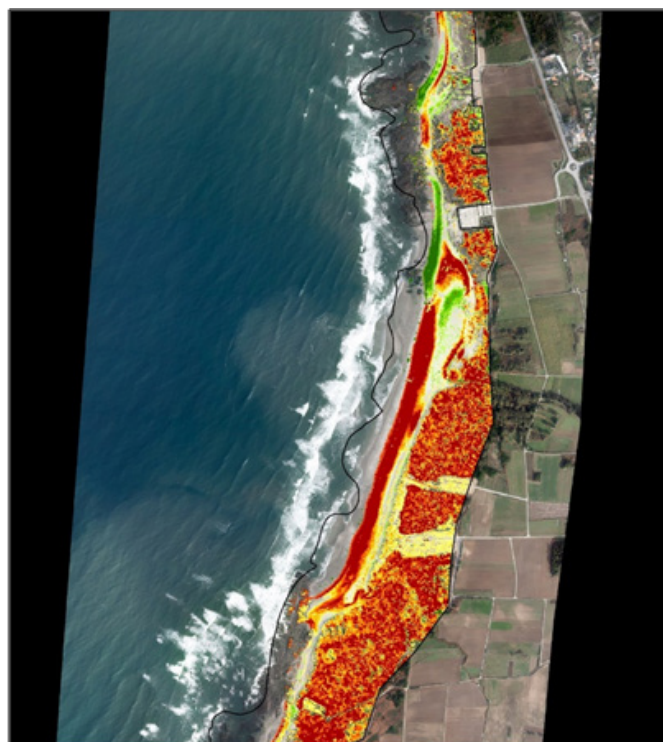


Figura 7. Diferença entre os MDS de Novembro de 2017 e Maio de 2018; observam-se trechos de praia arenosa com erosão (vermelho) e acreção (verde) e uma diminuição marcada da vegetação nas dunas (vermelho).

um plano nacional (ou vários regionais) de monitorização é, portanto, essencial. A nível nacional, o programa COSMO (<https://cosmo.apambiente.pt/>) constitui um passo na direção certa, tendo como objetivo a aquisição sistemática e com padrões de recolha, processamento e análise idênticos e padronizados, para a totalidade da faixa costeira nacional; embora, se limite a perfis e áreas limitadas em zonas selecionadas. A sua continuidade e o aumento da cobertura espacial é essencial para se caracterizarem de forma contínua os processos dinâmicos intensos e a variabilidade espacial intrínseca da costa NO de Portugal conforme se constata pelos resultados apresentados neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Programa Interreg V-A Espanha-Portugal (POCTEP), projeto 0262\_MarRISK\_1\_E, que apoiou o presente estudo. Este estudo foi ainda parcialmente apoiado pelo fundo estratégico UID/Multi/04423/2019 através de fundos nacionais da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia e o Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (ERDF), no âmbito do programa PT2020.

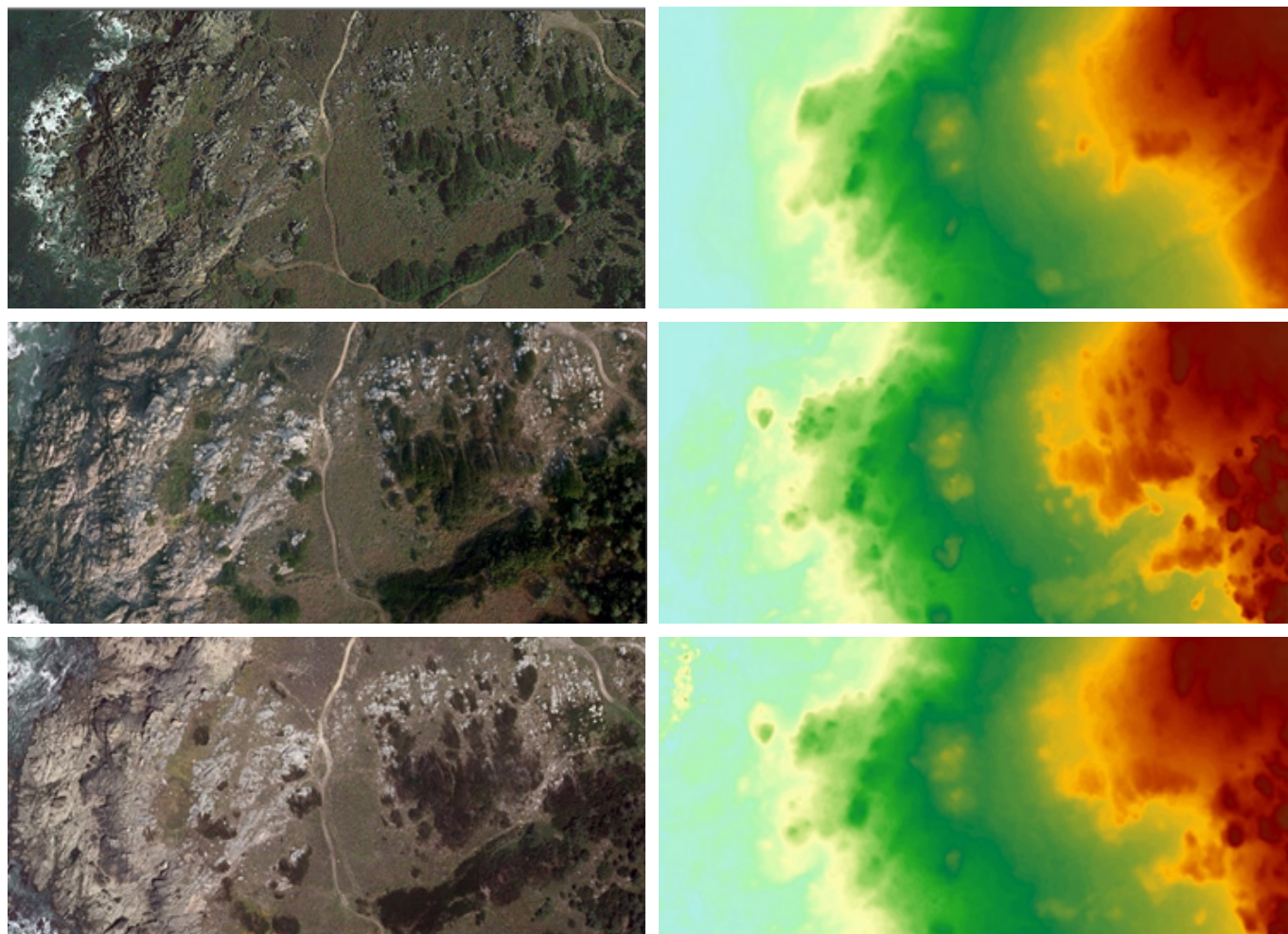


Figura 8. Pormenor da área de estudo com afloramentos rochosos: ortofotos obtidos em Agosto de 2013 (GoogleEarth) (A), Novembro de 2017 (C) e Maio 2018 (E), MDT de 2011 (B), MDS de 2017 (D) e MDS de 2018 (F) (modelos com a mesma escala de cor).

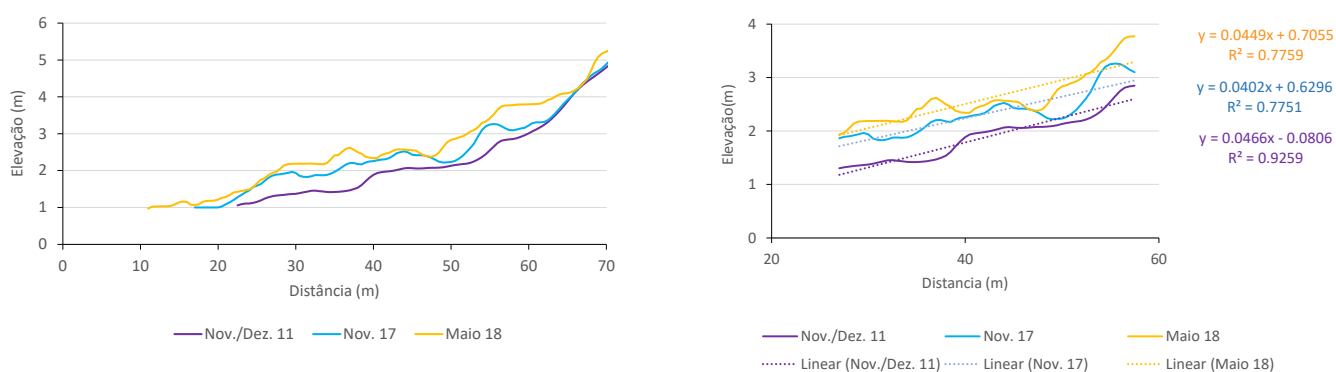


Figura 9. Perfis do MDT de 2011 e dos MDS de 2017 e 2018 para uma praia rochosa (A). Tal como para a análise dos volumes, considerou-se apenas o perfil acima da cota 1 m (NMM). O declive foi determinado por regressão linear para o trecho delimitado pelas cotas 2 m e 4 m NMM (B).

## REFERÊNCIAS

- Agisoft (2018). Agisoft Photoscan User Manual, Professional Edition, Version 1.4.
- Antonoli, F., Anzidei, M., Amorosi, A., Presti, V. L., Mastronuzzi, G., Deiana, G., ... Vecchio, A. (2017). Sea-level rise and potential drowning of the Italian coastal plains: Flooding risk scenarios for 2100. *Quaternary Science Reviews*, 158, 29–43. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.12.021
- Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal URL: [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html) (consultado em 10 de Dezembro 2019).
- Aucelli, P. P. C., Paola, G. D., Rizzo, A., & Roskopf, C. M. (2018). Present day and future scenarios of coastal erosion and flooding processes along the Italian Adriatic coast: the case of Molise region. *Environmental Earth Sciences*, 77(10). doi: 10.1007/s12665-018-7535-y
- Bio, A., Bastos, L., Granja, H., Pinho, J., Gonçalves, J., Henriques, R., Madeira, S., Magalhães, A., Rodrigues, D. (2015). Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies. *Revista De Gestão Costeira Integrada*, 47–63. doi: 10.5894/rgci490
- Carapuço, M. M., Taborda, R., Silveira, T. M., Psuty, N. P., Andrade, C., & Freitas, M. C. (2016). Coastal geoindicators: Towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments. *Earth-Science Reviews*, 154, 183–190. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.01.002
- DGT – Direção-Geral do Território (2018). *Modelo Digital do Terreno das Zonas Costeiras de Portugal Continental com resolução de 1 m (400 m em terra) – LiDAR (Continente) metadados e auto-avaliação*. Last updated: 02-02-2018, available at: <http://snig.dgterritorio.pt/geoportail/catalog/search/resource/detailsPretty.page?uuid=%7BEC94A6C0-0971-4725-B647-2FEC93594D88%7D>
- EEA–European Environment Agency (2006). *The changing faces of Europe's coastal areas*. EEA Report No. 6/2006. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. [http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2006\\_6](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_6)
- EEA–European Environment Agency (2013) Balancing the future of Europe's coasts. EEA Report No. 12/2013. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. <https://www.eea.europa.eu/publications/balancing-the-future-of-europes>
- Eichentopf, S., Karunaratna, H., & Alsina, J. M. (2019). Morphodynamics of sandy beaches under the influence of storm sequences: Current research status and future needs. *Water Science and Engineering*, 12(3), 221–234. doi: 10.1016/j.wse.2019.09.007
- Ferreira, Ó., Plomaritis, T. A., & Costas, S. (2017). Process-based indicators to assess storm induced coastal hazards. *Earth-Science Reviews*, 173, 159–167. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.07.010
- Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F. B. E., Herrera, M. A. M., Leblois, A., Lavalle, C., ... Feyen, L. (2018). Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97–107. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007
- Gonçalves, J. A., Bastos, L., Madeira, S., Magalhães, A., & Bio, A. (2018). Three-dimensional data collection for coastal management – efficiency and applicability of terrestrial and airborne methods. *International Journal of Remote Sensing*, 39(24), 9380–9399. doi: 10.1080/01431161.2018.1523591
- Gonçalves, J., Bastos, L., Pinho, J. & Granja, H. (2011). Digital aerial photography to monitor changes in coastal areas based on direct georeferencing. 5th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Prague, June 2011. <http://www.conferences.earsel.org/abstract/show/2689>
- Harrison, P. A., Dunford, R. W., Holman, I. P., Cojocar, G., Madsen, M. S., Chen, P.-Y., Pedde, S., Sandars, D. (2019). Differences between low-end and high-end climate change impacts in Europe across multiple sectors. *Regional Environmental Change*, 19(3), 695–709. doi: 10.1007/s10113-018-1352-4
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V. R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea & L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688
- Jiménez, A. C., Ávila, J. I. E., Lacouture, M. M. V., & Casarín, R. S. (2016). Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast. *Coastal Management*, 44(4), 333–349. doi: 10.1080/08920753.2016.1155038
- Johnson, J. M., Moore, L. J., Ells, K., Murray, A. B., Adams, P. N., Mackenzie, R. A., & Jaeger, J. M. (2015). Recent shifts in coastline change and shoreline stabilization linked to storm climate change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(5), 569–585. doi: 10.1002/esp.3650
- Lopes, C. (2016). *Avaliação de Risco de Inundação na Ria de Aveiro em Cenários Atuais e Futuros*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 224 p. <https://ria.ua.pt/handle/10773/16277?mode=full>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G. & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports* 8: 6641. doi:10.1038/s41598-018-24630-6
- Mauff, B. L., Juigner, M., Ba, A., Robin, M., Launeau, P., & Fattal, P. (2018). Coastal monitoring solutions of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France). *Geomorphology*, 304, 121–140. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.12.037
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *Plos One*, 10(3). doi: 10.1371/journal.pone.0118571
- Nguyen, T. T., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18–43. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022
- Nicholls, R. J. (2010). *Impacts of and responses to sea-level rise*. In: Church, J. A., Woodworth, P. L., Aarup, T. & Wilson, W. S. (eds.) *Understanding sea-level rise and variability*. Wiley-Blackwell, Oxford. 10.1002/9781444323276.ch2

*Indicadores de vulnerabilidade de erosão costeira: Um estudo de caso no Norte de Portugal*

- Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V. R., Codignotto, J., Hay, J. E., McLean, R. F., Ragoonaden, S. & Woodroffe, C. D. (2007). *Coastal systems and low-lying areas*. In: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. & Hanson, C. E. (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 315–356
- Nijland, W., Reshitnyk, L. Y., Starzomski, B. M., Reynolds, J. D., Darimont, C. T., & Nelson, T. A. (2017). Deriving Rich Coastal Morphology and Shore Zone Classification from LIDAR Terrain Models. *Journal of Coastal Research*, 33(4), 949–958. doi: 10.2112/jcoastres-d-16-00109.1
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., & Storlazzi, C. D. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7(1). doi: 10.1038/s41598-017-01362-7