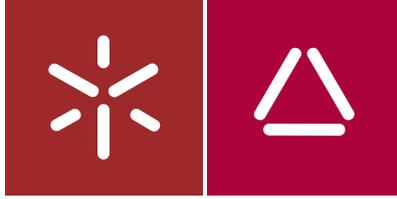




Universidade do Minho
Instituto de Ciências Sociais

Jorge Leandro Ramalho Novais

Aplicação de Sistemas de Informação
Geográfica e Drones para Análise da Erosão
Costeira no Parque Natural do Litoral Norte



Universidade do Minho
Instituto de Ciências Sociais

Jorge Leandro Ramalho Novais

Aplicação de Sistemas de Informação
Geográfica e Drones para Análise da Erosão
Costeira no Parque Natural do Litoral Norte

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Geografia
Especialização em Sistemas de Informação geográfica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor António Avelino Batista Vieira

Setembro, 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não é apenas o resultado do empenho e esforço individual, mas também do apoio de inúmeras pessoas, sem as quais teria sido muito difícil chegar ao fim desta etapa. Cabe-me demonstrar os meus profundos e sinceros agradecimentos a todos eles.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, o Professor Doutor António Avelino Batista Vieira, expresso a minha gratidão por toda a partilha de conhecimentos, por todos os sábios conselhos e por todo o acompanhamento e disponibilidade. Agradeço ainda mais a oportunidade de me ter integrado no projeto *CLICTOUR - Turismo resiliente às alterações climáticas em áreas protegidas do Norte de Portugal*, projeto esse fundamental para a realização desta dissertação.

À Sara, ao Tiago e ao Saulo, a equipa do CLICTOUR, pelo apoio e conhecimento transmitido ao longo deste último ano e por todos os bons momentos passados dentro e fora do escritório.

Ao restante corpo docente e não docente do Departamento de Geografia da Universidade do Minho, pelo apoio, conhecimentos e conselhos transmitidos.

A todos aqueles que se cruzaram comigo nestes últimos 5 anos, dentro e fora da Universidade, em especial aos que ingressaram comigo em 2018, agradeço todos os momentos inesquecíveis e todo o apoio demonstrado. Certamente serão pessoas e momentos que levarei para o resto da vida!

Um agradecimento especial à Margarida, por todo o companheirismo, força e incentivo ao longo destes anos e por me ajudar em tudo o que pôde. Tornaste tudo mais fácil.

Por último, mas não menos importante, à minha família, por me proporcionarem a oportunidade de frequentar o ensino superior.

A todos vós, dedico este trabalho!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica e Drones para Análise da Erosão Costeira no Parque Natural do Litoral Norte

Nas últimas décadas, a migração das atividades humanas para as zonas costeiras aumentou significativamente, não só em Portugal, mas em todo o planeta. Nalguns locais, a fixação das atividades antrópicas levou ao aumento da construção no interior do sistema praia/duna e à fixação de mais população, aumentando a pressão humana sobre as zonas costeiras. Embora sejam uma transformação natural, os processos de erosão costeira têm sido agravados pela ação humana, sobretudo em resultado da construção de obras de defesa costeira (na maior parte das vezes com carácter de urgência e, conseqüentemente, mal planeados), mas também agravados pela subida do nível médio da água do mar decorrente das mudanças climáticas.

A costa portuguesa apresenta, no geral, um ambiente muito dinâmico e muito sensível a fenómenos naturais e antrópicos, tendo sofrido, nos últimos anos, processos erosivos muito acentuados. Em particular, o Parque Natural do Litoral Norte, tem se destacado como uma das regiões mais problemáticas do norte do país relativamente à erosão costeira, tendo esta já levado à destruição de habitações e outras infraestruturas, agravando, a cada ano, o risco para as populações aí instaladas. Neste contexto, torna-se indispensável monitorizar e criar bases de dados espaciais com informação de elevada precisão e de baixo custo.

Neste trabalho, desenvolvido no âmbito do projeto *CLICTOUR - Turismo resiliente às alterações climáticas em áreas protegidas do Norte de Portugal*, foi selecionada uma área do Parque Natural do Litoral Norte, localizada no município de Esposende: um segmento compreendido entre a Restinga de Ofir e a Praia da Bonança.

Para a prossecução deste trabalho, foram utilizadas como principais ferramentas imagens aéreas obtidas através de drones, bem como imagens de satélite obtidas a partir do Google Earth. Foram aplicadas técnicas de fotogrametria, SfM (Structure-from-Motion) e modelação 3D, em conjunto com Sistemas de Informação Geográfica, com o objetivo de demonstrar a eficiência destas metodologias de baixo custo, atestar a qualidade de modelos tridimensionais para monitorização costeira, quantificar e avaliar as alterações costeiras através de diferentes métodos e fornecer dados e previsões às instituições competentes pela gestão costeira.

PALAVRAS-CHAVE: SIG; Erosão Costeira; Drones; Fotogrametria; Parque Natural do Litoral Norte;

ABSTRACT

Application of Geographic Information System and Drones for Analysis of Coastal Erosion in the Natural Park of Litoral Norte

In recent decades, the migration of human activities to coastal areas has increased significantly, not only in Portugal but across the globe. In some places, the settlement of anthropogenic activities has led to increased construction within the beach/dune system and the settlement of more population, increasing human pressure on coastal areas. Although they are a natural transformation, coastal erosion processes have been aggravated by human action, mainly because of the construction of coastal defense works (most of the time with an emergency character and, consequently, poorly planned), but also aggravated by the rise in the average sea water level due to climate change.

The Portuguese coast is, in general, a very dynamic environment and very sensitive to natural and anthropic phenomena, having suffered, in recent years, very accentuated erosive processes. In particular, the North Coast Natural Park has stood out as one of the most problematic regions in the north of the country in relation to coastal erosion, which has already led to the destruction of housing and other infrastructure, aggravating the risk for the populations installed there each year. In this context, it is essential to monitor and create spatial databases with high precision and low cost information.

In this work, carried out as a part of the “CLICTOUR project - Climate change resilient tourism in protected areas of Northern Portugal”, an area of the North Coast Natural Park, located in the municipality of Esposende, was selected: a segment between Restinga de Ofir and Praia da Bonança.

For the pursuit of this work, aerial images obtained by drones were used as the main tools, as well as satellite images obtained from Google Earth. Photogrammetry, SfM (Structure-from-Motion) and 3D modeling techniques were applied, together with Geographic Information Systems, with the aim of demonstrating the efficiency of these low-cost methodologies, attesting the quality of three-dimensional models for coastal monitoring, quantifying, and assessing coastal changes through different methods and providing data and forecasts to the competent institutions for coastal management.

KEYWORDS: GIS; Coastal Erosion; Drones; Photogrammetry; Natural Park of Litoral Norte.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xvii
INTRODUÇÃO.....	1
Contexto Geral	3
Questões de Partida e Objetivos	6
Informação Geográfica e Cartográfica de Base.....	7
Estrutura da Dissertação	8
CAPÍTULO I - ENQUADRAMENTO TEÓRICO DA EROSÃO COSTEIRA E A SUA MONITORIZAÇÃO.....	9
1.1. A Erosão Costeira	11
1.1.1. Causas	11
1.1.2. Consequências	21
1.1.3. Panorama Nacional	23
1.1.4. Medidas de Adaptação à Erosão Costeira em Portugal.....	26
1.1.5. Estado Atual do Conhecimento Científico sobre a Erosão Costeira	29
1.2 Monitorização da Erosão Costeira.....	31
1.3. Drones / Veículos Aéreos Não Tripulados.....	36
1.3.1. Tipos de Drone	36
1.3.2. Vantagens e Desvantagens da Utilização de Drones.....	38
1.3.3. Áreas de Aplicação	40
1.3.4. Estado Atual e Tendências de Investigação sobre a Monitorização das Alterações da Linha de Costa com Recurso a Drones.....	41
1.4. Fotografia Aérea.....	46
1.4.1. Fotogrametria e <i>Structure-from-Motion</i>	46
1.4.2. Estereoscopia e Sobreposição	48
1.4.3. <i>Ground Control Points</i> : Ortorretificação e Georreferenciação	49
1.4.4. Ortofotomapas, Modelos Digitais de Terreno e de Superfície	51

1.5. Sistemas de Informação Geográfica.....	53
1.5.1. Conceito e Evolução dos SIG.....	53
1.5.2. Estrutura dos SIG.....	54
1.5.3. Potencialidades e Aplicações dos SIG.....	55
1.5.4. Sistemas de Informação Geográfica e Erosão Costeira na agenda científica	57
<i>CAPÍTULO II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</i>	59
2.1. Enquadramento Geográfico	61
2.2. Geologia	63
2.3. Geomorfologia	65
2.4. Uso e Ocupação do Solo	67
<i>CAPÍTULO III – PROPOSTAS METODOLÓGICAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DA TAXA DE MIGRAÇÃO COSTEIRA.....</i>	68
3.1. Indicadores de Posição da Linha de Costa.....	70
3.2. Levantamentos Aéreos.....	72
3.2.1. Materiais e Metodologias.....	72
3.2.2. Processamento Fotogramétrico.....	76
3.3. ANÁLISE 1 – Análise das Alterações Topográficas e Volumétricas	81
3.3.1. Materiais e Metodologias.....	81
3.4. ANÁLISE 2 – <i>Digital Shoreline Analysis System</i> : Análise e Previsão das Alterações da Linha de Costa....	83
3.5.1. Materiais e Metodologias.....	83
<i>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</i>	88
4.1. Levantamentos Aéreos.....	90
4.1.1. Resultados.....	90
4.2. ANÁLISE 1 – Análise das Alterações Topográficas e Volumétricas	92
4.2.1. Resultados e Análise	92
4.3. ANÁLISE 2 – <i>Digital Shoreline Analysis System</i> : Análise e Previsão das Alterações da Linha de Costa..	106
4.3.1. Resultados e Análise	106
<i>CAPÍTULO V – SÍNTESE FINAL E RECOMENDAÇÕES.....</i>	112
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	120
<i>ANEXOS.....</i>	133

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA I - 1: PRESUMÍVEL LINHA DE COSTA, NA PLATAFORMA CONTINENTAL PORTUGUESA	13
FIGURA I - 2: AMPLITUDE DA ALTURA DAS MARÉS NA PRAIA DA BONANÇA.....	16
FIGURA I - 3: ONDULAÇÃO INCIDENTE NUM ESPORÃO TRANSVERSAL EM CONDIÇÕES DE TEMPESTADE DE INVERNO.....	20
FIGURA I - 4: TIPOS DE AMBIENTE COSTEIRO EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	24
FIGURA I - 5: LINHA DE COSTA EM SITUAÇÃO DE EROSÃO COSTEIRA EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	25
FIGURA I - 6: N° DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS SOBRE EROSÃO COSTEIRA	30
FIGURA I - 7: DISTRIBUIÇÃO MUNDIAL DAS PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS SOBRE EROSÃO COSTEIRA.	31
FIGURA I - 8: EVOLUÇÃO DO N° DE PUBLICAÇÕES SOBRE A MONITORIZAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DA LINHA DE COSTA COM RECURSO A DRONE	42
FIGURA I - 9: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS PUBLICAÇÕES.....	42
FIGURA I - 10: REDE DE KEYWORDS MAIS UTILIZADAS PELOS AUTORES	44
FIGURA I - 11: WORKFLOW DO PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO	47
FIGURA I - 12: REPRESENTAÇÃO DA TÉCNICA DE ESTEREOSCOPIA.	48
FIGURA I - 13: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA SOBREPOSIÇÃO LATERAL E LONGITUDINAL	49
FIGURA I - 14: ESQUEMA COMPARATIVO ENTRE MDS (LINHA VERMELHA) E MDT (LINHA VERDE)	52
FIGURA I - 15: ESTRUTURA DOS DADOS DOS SIG	55
FIGURA I - 16: EVOLUÇÃO DO N° DE PUBLICAÇÕES SOBRE OS SIG E EROSÃO COSTEIRA.....	58
FIGURA II - 1: MAPA DO ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DO PARQUE NATURAL DO LITORAL NORTE	62
FIGURA II - 3: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO, COM AMPLIAÇÃO DA FOLHA 5-C DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL.....	64
FIGURA II - 2: CARACTERIZAÇÃO HIPSOMÉTRICA DO PNLN.....	65
FIGURA II - 4: MAPA DOS USOS E OCUPAÇÃO DO SOLO NO PNLN E NO SEGMENTO COSTEIRO EM ANÁLISE	67
FIGURA III - 1: INDICADORES DE POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA	70
FIGURA III - 2: EXEMPLO DA POSIÇÃO DA LINHA DE MARÉ ALTA ANTERIOR	71
FIGURA III - 3: A- DJI PHANTOM 4 PRO; B- GPS SPECTRA GEOSPATIAL SP60.....	73
FIGURA III - 4: EXEMPLOS DE PONTOS DE CONTROLO NO TERRENO	74
FIGURA III - 5: PARÂMETROS DOS VOOS NO PIX4DCAPTURE	76
FIGURA III - 6: PARÂMETROS PARA O ALINHAMENTO DAS IMAGENS E GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS ESPARSA	77
FIGURA III - 7: NUVEM DE PONTOS ESPARSA COM A POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS CÂMARAS	78
FIGURA III - 8: NUVEM DE PONTOS DENSA	79
FIGURA III - 9: PARÂMETROS PARA A CONSTRUÇÃO DO ORTOFOTOMAPA	80

FIGURA III - 10: LOCALIZAÇÃO DAS 3 ÁREAS ESPECÍFICAS	81
FIGURA III - 11: PARÂMETROS DA BASELINE E DAS LINHAS DE COSTA	84
FIGURA III - 12: PROPRIEDADES DOS TRANSETOS	85
FIGURA III - 13: ESQUEMA EXPLICATIVO DE TRÊS TAXAS DE EROÇÃO COSTEIRA	86
FIGURA IV - 1: MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DA ÁREA DE ESTUDO.....	90
FIGURA IV - 2: ORTOFOTOMAPA DA ÁREA DE ESTUDO	91
FIGURA IV - 3: VARIAÇÃO ALTIMÉTRICA NA RESTINGA DE OFIR ENTRE 2018 E 2023	92
FIGURA IV - 4: PERFIL TOPOGRÁFICO 1 DA RESTINGA DE OFIR.....	93
FIGURA IV - 5: PERFIL TOPOGRÁFICO 2 DA RESTINGA DE OFIR.....	94
FIGURA IV - 6: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA NA RESTINGA DE OFIR ENTRE 2018 E 2023.....	95
FIGURA IV - 7: VARIAÇÃO ALTIMÉTRICA DA PRAIA DE OFIR ENTRE 2018 E 2023.....	96
FIGURA IV - 8: PERFIL TOPOGRÁFICO 1 DA PRAIA DE OFIR	97
FIGURA IV - 9: PERFIL TOPOGRÁFICO 2 DA PRAIA DE OFIR	98
FIGURA IV - 10: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA NA PRAIA DE OFIR ENTRE 2018 E 2023.....	99
FIGURA IV - 11: VARIAÇÃO ALTIMÉTRICA NA PRAIA DA BONANÇA ENTRE 2018 E 2023.....	100
FIGURA IV - 12: PERFIL TOPOGRÁFICO 1 DA PRAIA DA BONANÇA.....	101
FIGURA IV - 13: PERFIL TOPOGRÁFICO 2 DA PRAIA DA BONANÇA.....	102
FIGURA IV - 14: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS NA PRAIA DA BONANÇA ENTRE 2018 E 2023 ..	103
FIGURA IV - 15: GEOCILINDROS E MUROS EM PEDRA PARA PROTEÇÃO DAS HABITAÇÕES NA PRAIA DE OFIR.....	108
FIGURA IV - 16: CONSTRUÇÃO EM PEDRA NA PRAIA DA BONANÇA PARA PROTEÇÃO DE HABITAÇÃO	108
FIGURA IV - 17: RESULTADOS DE 3 TAXAS ESTATÍSTICAS (EPR, NSM E SCE) NA ÁREA DE ESTUDO.....	109
FIGURA IV - 18: PREVISÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DO TOPO DE DUNA PARA 2033 E 2043, COM AMPLIAÇÃO A DUAS ZONAS CRÍTICAS	110

ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS

TABELA 1: QUESTÕES DE PARTIDA E METODOLOGIAS APLICADAS	6
TABELA I - 1: MEDIDAS "LEVES" E "PESADAS" DE ADAPTAÇÃO	27
TABELA I - 2: PRINCIPAIS DIFERENÇAS NAS CARACTERÍSTICAS ENTRE DOIS TIPOS DE DRONES	37
TABELA I - 3: PALAVRAS-CHAVE MAIS UTILIZADAS.....	43
TABELA I - 4: AUTORES COM MAIS PUBLICAÇÕES E COM O MELHOR M-INDEX	45
TABELA III - 1: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS LEVANTAMENTOS AÉREOS	75
TABELA IV - 1: VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA NA RESTINGA DE OFIR.....	95
TABELA IV - 2: DIFERENÇAS VOLUMÉTRICAS NA PRAIA DE OFIR.....	99
TABELA IV - 3: DIFERENÇAS VOLUMÉTRICAS NA PRAIA DA BONANÇA.....	103
TABELA IV - 4: RESULTADOS DA TAXA SHORELINE CHANGE ENVELOPE.....	106
TABELA IV - 5: RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA TAXA NET SHORELINE MOVEMENT.....	106
TABELA IV - 6: RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA TAXA END POINT RATE.	106
QUADRO I - 1: EVOLUÇÃO DAS PRÁTICAS DA ADAPTAÇÃO PLANEADA DAS ZONAS COSTEIRAS	28

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I: COORDENADAS E PRECISÃO DOS GROUND CONTROL POINTS.....	134
ANEXO II: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS GROUND CONTROL POINTS.....	135
ANEXO III: PARÂMETROS DO PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO.....	136
ANEXO IV: LOCALIZAÇÃO E SOBREPOSIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS.	138

LISTA DE ABREVIATURAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CAOP	Carta Administrativa Oficial de Portugal
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DGT	Direção Geral do Território
ENGIZC	Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira
EPR	<i>End Point Rate</i>
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
IPTM	Instituto Portuário e dos Transportes Marinhos
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LRR	<i>Linear Regression Rate</i>
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
NFZ	<i>No Fly Zones</i>
NSM	<i>Net Shoreline Movement</i>
PIB	Produto Interno Bruto
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SANT	Sistema Aéreo Não Tripulado
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SCE	<i>Shoreline Change Envelope</i>
SfM	<i>Structure-from-Motion</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

UVS	<i>Unmanned Vehicles System</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WLR	<i>Weighted Linear Regression</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

INTRODUÇÃO

“Man must rise above Earth – to the top of the atmosphere and beyond – for only thus will he fully understand the world in which he lives.”

– Socrates (469 - 399 B.C.)

Contexto Geral

A linha de costa é a fronteira física entre a terra e a água e é definida como a interseção múltipla entre vários sistemas terrestres: a litosfera, a hidrosfera, a atmosfera e a biosfera (Dolan *et al.*, 1991). A linha costeira é uma zona de grande dinâmica, onde ocorrem transformações físicas, por vezes de forma muito abrupta. Nestas zonas, o equilíbrio dinâmico é bastante frágil e sensível a impactes, sejam naturais ou antrópicos (Granja, 2002). Assim, podem entender-se as zonas costeiras como as zonas mais dinâmicas à superfície da Terra (Dias, 2004).

Esta dinâmica acontece devido a condições naturais tais como as ondas, as marés, o vento, tempestades periódicas, alterações do nível do mar e processos geomorfológicos de erosão e acreção. Para além destas condições naturais, existem fatores induzidos pela atividade humana que contribuem para o dinamismo das zonas costeiras como as barragens e a extração de minérios, entre outros (Salghuna & Bharathvaj, 2015).

Com todas estas características, o dinamismo litoral está fortemente relacionado com os processos de erosão costeira e com o recuo da linha de costa, que, por sua vez, têm vindo a ser cada vez mais intensos. Em termos globais, a erosão costeira atinge 70% das praias arenosas de todo o planeta (G. Gonçalves *et al.*, 2016). A erosão costeira é o principal motivo pelo qual as zonas litorais são de extrema sensibilidade ambiental. Essa sensibilidade reflete os impactes da interação das atividades humanas com os sistemas costeiros.

Em Portugal, nas recentes décadas assistiu-se à “litoralização” económica e social do país, contribuindo fortemente para a artificialização e ocupação da orla costeira, especificamente no sistema duna-praia. Segundo os dados dos Censos 2021, cerca de 82% da população portuguesa habita a menos de 30 Km da costa, que equivale a 70% dos edifícios do país. Estes dados refletem a enorme pressão antrópica que ocorre na faixa litoral que é utilizada principalmente para habitação, agricultura, indústria, pesca, transporte e turismo. Além disso, nos últimos anos tem-se discutido o aproveitamento energético das ondas e das marés (Davidson-Arnott *et al.*, 2019).

Neste contexto, e tendo em conta que a linha de costa está em constante movimento, a gestão costeira tornou-se um assunto prioritário no planeamento territorial. Assim, de forma a contribuir para uma gestão costeira adequada é necessário compreender os fatores que definem e condicionam a mobilidade da linha costeira. Uma das abordagens de uma gestão costeira adequada requer a monitorização constante das alterações da linha de costa de forma a acompanhar as suas mudanças e fornecer dados rigorosos às entidades responsáveis pelo planeamento do território (Misra & Balaji, 2015).

A monitorização da erosão costeira de qualidade requer informação rápida, correta e atualizada sobre pequenos movimentos (Papakonstantinou *et al.*, 2017). Essa monitorização deve ser adaptada às especificidades de cada local e ser eficiente, no que diz respeito aos recursos financeiros, sem que se comprometa a fiabilidade dos resultados. No panorama nacional, a fragilidade económica de Portugal exige que os projetos de monitorização costeira sejam implementados com ferramentas de baixo custo, mas que não comprometam nem a precisão, nem a qualidade dos dados obtidos.

Neste cenário, várias metodologias de monitorização e várias ferramentas têm sido testadas desde que a monitorização das alterações costeiras tem sido foco de investigação científica. Contudo, devido às características que tornam únicas as zonas costeiras, muitas das metodologias testadas foram sendo abandonadas, seja por não apresentarem resultados com a qualidade exigida, seja por se mostrarem financeiramente insustentáveis, seja por utilizarem ferramentas que não se adaptam ao ambiente costeiro ou à rapidez de obtenção de resultados (Bio *et al.*, 2015).

Das várias metodologias testadas, a deteção remota tem-se destacado como a técnica mais eficaz, considerando o seu baixo custo e elevada qualidade dos resultados. Relativamente à monitorização costeira, a deteção remota é uma tecnologia chave, e apresenta várias soluções. De forma geral, a deteção remota entende-se como um conjunto de técnicas que permitem a aquisição de informação sobre um objeto ou fenómeno sem estar em contacto físico com esse mesmo objeto ou fenómeno, e é frequentemente associado à utilização das imagens de satélite. Contudo, a deteção remota pode ser realizada com recurso a câmaras normais RGB, vários tipos de sensores, câmaras espectrais, câmaras infravermelhos, e que são, na maioria das vezes, acoplados a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), sendo denominados também como Sistemas Aéreos Não Tripulados (SANT) ou vulgarmente conhecidos como drones (para uniformização linguística, na redação deste trabalho será utilizado o termo “drone”). Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, os drones registaram uma grande evolução, seja na massificação da sua utilização, seja na melhoria das suas características tecnológicas. Estes dois fatores tornaram mais acessível e viável a utilização de drones na monitorização da erosão costeira. Nos últimos anos, os drones tornaram-se ferramentas cada vez melhores nas suas características (menos peso, mais autonomia, melhor qualidade de câmaras e sensores, entre outros) e cada vez mais acessíveis (melhor relação custo-benefício e maior facilidade de acesso). Assim, esta tecnologia apresenta fortes capacidades para responder às necessidades da monitorização das alterações da linha de costa. Apesar disso, os drones são apenas uma ferramenta de aquisição de dados, sendo que é necessário efetuar uma análise desses dados para, posteriormente, gerar informação útil aos órgãos de governação.

Desta forma, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e os softwares de fotogrametria são frequentemente utilizados em conjunto com os drones para recolher, analisar e visualizar dados espaciais. Com a manipulação dos softwares de fotogrametria, os dados obtidos pelos drones podem ser transformados em mapas e ortomosaicos detalhados, modelos 3D, Modelos Digitais Terrestres (MDT) para, posteriormente, serem processados e analisados pelos SIG (Anfuso & Martínez del Pozo, 2005). Os SIG são uma ferramenta poderosa que é utilizada numa grande diversidade de áreas, incluindo planeamento urbano, estudos ambientais, planeamento de transportes, e muitos outros. No que concerne à monitorização da erosão costeira, com a utilização de SIG, e ao sobrepor dados históricos da linha de costa com dados mais recentes, os investigadores e as entidades costeiras conseguem uma melhor compreensão dos processos dinâmicos que moldam o ambiente costeiro, identificar as principais áreas em risco de erosão e outros perigos e visualização e quantificação nas alterações da forma e posição da linha de costa (Makota *et al.*, 2004).

Questões de Partida e Objetivos

Para qualquer investigação, é fundamental considerar as questões de partida e definir um conjunto de objetivos que lhes deem resposta, de modo a alcançar uma conclusão clara e precisa.

Por conseguinte, a presente investigação tem como principais objetivos (1) a avaliação da utilização dos drones e dos Sistemas de Informação Geográfica na análise da erosão costeira e (2) quantificação das alterações da forma e posição da linha de costa, fornecendo dados fiáveis às entidades competentes pela gestão das zonas costeiras. A concretização dos objetivos centrais depende das respostas encontradas para as questões de partida que sustentam esta investigação. Na Tabela 1, são apresentados os objetivos desta dissertação, sendo que para cada um deles se indicaram as respetivas questões de partida, bem como a metodologia abordada para dar resposta a cada uma dessas questões.

QUESTÕES DE PARTIDA	METODOLOGIA
OBJETIVO 1	
<i>Avaliação da utilização dos drones e dos Sistemas de Informação Geográfica na análise da erosão costeira.</i>	
Qual a importância da monitorização costeira?	Revisão sistemática e análise de trabalhos científicos em revistas internacionais.
Que metodologias e requisitos para monitorização das alterações da linha de costa são os mais utilizados?	Revisão da literatura e comparação de resultados das diferentes metodologias adotadas em artigos científicos.
OBJETIVO 2	
<i>Quantificação das alterações da posição e forma da linha de costa.</i>	
Quanto é que a linha de costa da área de estudo foi afetada pela erosão costeira no período de análise?	Levantamentos aéreos para delimitação da posição de linha de costa em diferentes momentos do período de análise. Análise quantitativa e estatística das alterações da linha de costa em ambiente SIG. Análise da evolução topográfica e volumétrica da área de estudo.
Qual é a influência que as obras de proteção marítima têm na erosão costeira?	Comparação dos resultados em zonas com e sem obras de proteção marítima.

Tabela 1: Questões de partida e metodologias aplicadas.

Informação Geográfica e Cartográfica de Base

A elaboração da cartografia descritiva é fundamental para a concretização dos objetivos definidos. Neste trabalho, a cartografia de base é essencial para a obtenção dos resultados, principalmente as imagens históricas. Nesse sentido, na

Tabela 2 é apresentada a informação geográfica e cartográfica de base utilizada nesta investigação e as respetivas fontes de informação.

INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA				
Dados	Fonte	Ano	Formato	Resolução
Limites Administrativos	Direção Geral do Território (<i>Carta Administrativa Oficial de Portugal de 2020</i>)	2020	<i>Shapefile</i>	
Usos do Solo	Direção Geral do Território (<i>Carta do Uso e Ocupação do Solo 2020</i>)	2020	<i>Shapefile</i>	
Geologia	Laboratório Nacional de Energia e Geologia (Folha 5-C da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000)	1969	<i>.jpeg</i>	1:50 000
Levantamentos Aéreos Costeiros entre 2018 e 2021	Agência Portuguesa do Ambiente (Programa COSMO)	2018 - 2021	<i>.tif</i>	10cm/pix
Hipsometria	Direção Geral do Território (Modelos Digitais de Terreno 2018)	2018	<i>.tif</i>	10m/pix
Imagens de Satélite entre 2006 e 2016	Google Earth Pro	2006 - 2016	<i>.jpeg</i>	Variável
Imagens Aéreas	Levantamentos aéreos com recurso a drone	2022-2023	<i>.jpeg</i>	2 a 3 cm/pix

Tabela 2: Fontes dos dados geográficos e cartográficos utilizados neste trabalho.

Estrutura da Dissertação

Para além deste item introdutório, importa referir que a presente dissertação é composta por 5 capítulos, os quais constituíram o processo de investigação.

O primeiro capítulo, de cariz mais teórico, e intitulado de “*Enquadramento Teórico das Alterações da Linha de Costa e a sua Monitorização*”, começa por abordar os aspetos teóricos que abrangem a problemática da erosão costeira, bem como uma análise bibliométrica do estado atual do conhecimento científico sobre as alterações da linha de costa. De seguida, é abordada a questão da monitorização das alterações da linha de costa, na qual é feita uma revisão da literatura para que se compreendam as metodologias de monitorização utilizadas atualmente. Posteriormente é feita uma abordagem mais técnica sobre drones, fotogrametria e os Sistemas de Informação Geográfica.

O segundo capítulo é uma caracterização da área de estudo, onde são feitos os enquadramentos geográfico, geomorfológico e geológico. Ademais, são identificados também os usos do solo.

O terceiro capítulo, intitulado de “*Propostas Metodológicas para a Quantificação da Taxa de Migração Costeira*”, corresponde à execução da parte prática. Inicialmente, são identificados os indicadores da posição da linha de costa, fundamentados por pressupostos teóricos. De seguida, são descritas as metodologias utilizadas neste trabalho para realizar os levantamentos aéreos, seguidos de duas propostas metodológicas para (1) análise topográfica das alterações morfológicas das dunas e (2) quantificação das alterações da posição da linha de costa.

O quarto capítulo diz respeito à apresentação dos resultados para cada uma das metodologias e uma análise detalhada desses mesmos resultados. Com este capítulo, espera-se criar informação rigorosa que sirva de alicerce a políticas de planeamento costeiro.

Por fim, no quinto capítulo é apresentada uma síntese final, no qual são discutidas as metodologias aplicadas nesta investigação, determinando a sua viabilidade e apontando as falhas. Neste capítulo são feitas também recomendações seja ao nível da investigação da erosão costeira, seja ao nível da monitorização do litoral, seja ao nível da gestão e do planeamento costeiro.

***CAPÍTULO I - ENQUADRAMENTO TEÓRICO DA EROSÃO COSTEIRA
E A SUA MONITORIZAÇÃO***

1.1. A Erosão Costeira

As alterações da linha de costa referem-se às mudanças na configuração da zona costeira ao longo do tempo, sendo fortemente associadas a processos de erosão costeira. Essas mudanças podem ocorrer devido a processos naturais, como a erosão e a sedimentação, ou a atividades humanas, como a construção de portos, barragens e outras infraestruturas costeiras.

A detecção antecipada das mudanças da linha de costa é fundamental para reconhecer as ameaças ambientais que afetam as zonas de praia nos parques costeiros, sendo que estas podem impactar negativamente os habitats naturais e destruir recursos culturais, instalações e outras infraestruturas. É crucial compreender o comportamento da linha costeira para identificar e compreender essas alterações ecológicas nos parques costeiros (<https://www.nps.gov/im/secn/shoreline-change.htm>).

1.1.1. Causas

A evolução atual da orla costeira, que se traduz pela deslocação das praias combinada com a consequente perda de areia e recuo das arribas associadas, tem várias causas, podendo estas ser naturais ou antropogénicas, ocorrer em diferentes escalas temporais e espaciais, tornando cada ambiente costeiro único (Dias, 2004).

Entre as causas naturais, destacam-se a subida do nível do mar, o balanço sedimentar, os processos costeiros tais como as ondas, as marés, as correntes, os ventos e as tempestades. Como fatores antropogénicos das alterações da linha de costa, destacam-se as barragens e outras intervenções nas bacias hidrográficas, ocupação da orla costeira e as obras de engenharia costeira (Loureiro, 2006).

Subida do nível do mar

A subida do nível do mar é considerada a principal causa de erosão costeira, não por ter efeitos diretos na costa, mas porque aumenta exponencialmente os efeitos dos processos costeiros, aumentando drasticamente a perigosidade destes. À medida que o nível do mar sobe, aumenta a quantidade de superfície terrestre que é inundada. As consequências dos processos de erosão costeira são maiores nos momentos em que a água atinge cotas mais elevadas (O'Neill, 1985). As variações globais do nível do mar são um fenómeno cientificamente denominado de eustatismo e resulta em mudanças absolutas no volume de água no mar, podendo ter diversas causas. O glacio-eustatismo é a principal causa das variações eustáticas e deve-se à retenção de gelo no interior dos continentes e ao seu posterior derretimento, causando mudanças no nível do mar de grande amplitude e ocorrem à mega-escala e à

macro-escala temporal (Loureiro, 2006). Um forte exemplo disso, observou-se ao largo do Porto, onde o nível do mar terá descido entre 120 a 140 metros na última glaciação, causando um avanço da linha de costa de 30 a 40 km (Dias *et al.*, 1997) (Figura I - 1). Além do glacio-eustatismo, há a considerar: (1) o termo-eustatismo, ou seja, variações do nível do mar causadas pelo aumento da temperatura, produzindo uma expansão da água nos oceanos, que será responsável por um aumento de 0.3mm a 0.7mm de subida do nível eustático (Paskoff, 2001); (2) o eustatismo geoidal, que corresponde às variações do nível do mar provocadas por deformações no relevo do geóide, resultantes de variações gravitacionais e rotacionais, visíveis apenas através de observações por satélite; (3) tectono-eustatismo, que está relacionado com o movimento das placas tectónicas, que originam deformação marginal dos continentes, fazendo com que a área continental mergulhe sob a água, enquanto que do lado oposto suba (Loureiro, 2006).

Atualmente, em Portugal, a faixa litoral está a ser afetada pela subida do nível do mar. Os efeitos dessa subida variam consoante os diferentes segmentos costeiros, de acordo com as suas características geomorfológicas, dependendo de se tratar de uma costa rochosa com arribas abruptas ou costas baixas e arenosas.

Segundo Alves (1996), Andrade (1990) e Teixeira (1990), na maior parte do litoral português, a atual elevação do nível do mar não tem um influência no recuo da linha de costa. Surge, então a necessidade de explicar o porquê das invasões marítimas que destruíram habitações e infraestruturas em várias localidades do país.

Para além dos impactes diretos causados pela subida do nível do mar (erosão de antigos cordões litorais e praias), existem consequências indiretas que afetam a zona costeira. Em resposta à subida do nível do mar, os estuários reduzem a quantidade de sedimentos transportados para a plataforma, de forma a adaptarem-se ao seu nível de base, deixando de serem fornecedores de sedimentos. Assim, em contexto de subida do nível do mar, o recuo da linha de costa é contemporâneo ao assoreamento dos estuários. Por outro lado, a descida do nível do mar leva a uma diminuição do nível de base dos rios, envolvendo o escavamento dos talwegues e, conseqüentemente, o aumento do transporte de grandes cargas de sedimentos ao longo dos cursos dos rios até à plataforma continental, transformando as zonas costeiras em locais de deposição de sedimentos (Loureiro, 2006), contribuindo para a reversibilidade dos processos erosivos.

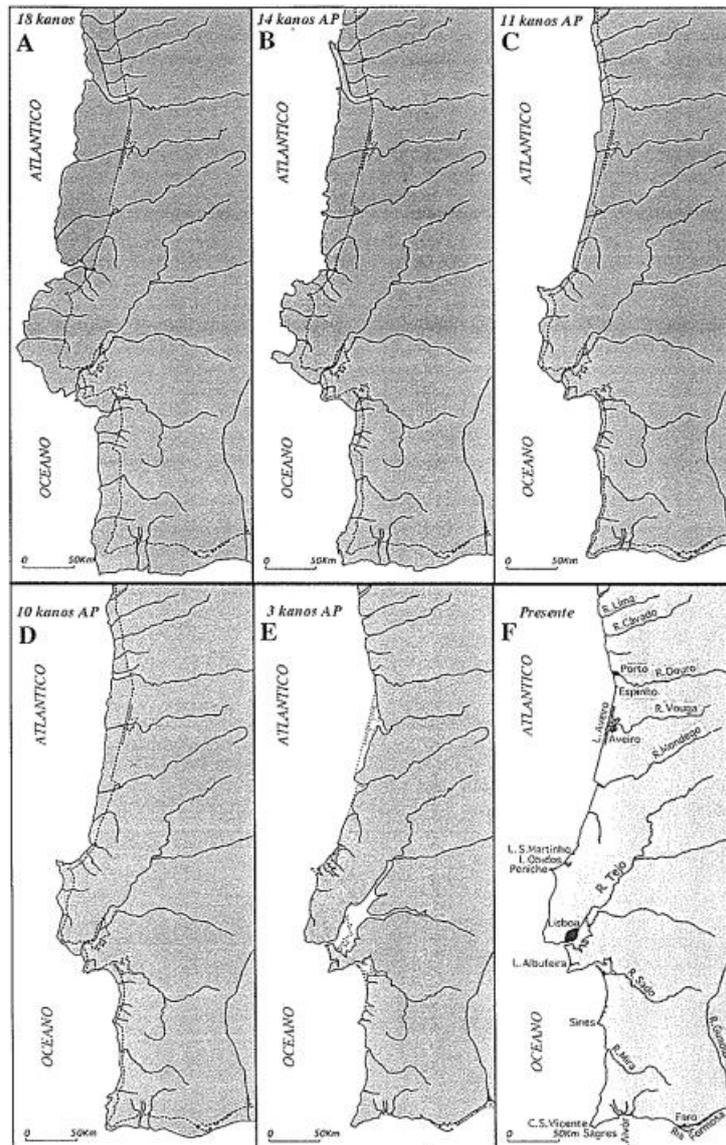


Figura I - 1: Presumível linha de costa, na plataforma continental portuguesa. A - há 18ka (último Máximo Glaciário), B - no final da glaciação (14ka), C - quase no final do deglaciário (11ka - início do Dryas recente), D - no início do Holocénico (10ka), E - quando o nível do mar atingiu aproximadamente a cota atual (3ka), F - na atualidade.

Fonte: Dias *et al.*, 1997

Balanço sedimentar

O balanço sedimentar expressa a relação entre os ganhos e as perdas sedimentares, causados pelos diversos fatores que afetam os sistemas costeiros. Pressupõe a existência de fontes de sedimentação e “destruidores” de sedimentos. À mesoescala (década-ano), está fortemente relacionado com os processos costeiros, com fatores meteorológicos e, nas últimas décadas, também com a atividade antropogénica.

Através da utilização de fórmulas matemáticas que levam em conta os processos hidro e morfodinâmicos, é possível obter estimativas dos volumes de sedimentos deslocados entre a orla costeira e a plataforma continental para calcular o balanço sedimentar. No entanto, a determinação precisa dos volumes sedimentares em zonas de inversão da deriva litoral e dos sedimentos transportados pelas correntes de retorno é um desafio, o que pode levar a resultados aproximados ao invés de absolutos no cálculo do balanço sedimentar através das fórmulas matemáticas (Henriques, 2006; Loureiro, 2006).

Atualmente, as fontes de sedimentos que funcionaram no passado, nomeadamente as bacias hidrográficas, não conseguem repor o volume sedimentar que se perde, sendo que, nos dias de hoje, a principal fonte de sedimentos é aquela que provém do desmantelamento das dunas (Loureiro, 2006), representando um ciclo de autodestruição dos sistemas costeiros.

Devido às mudanças climáticas atuais e ao facto de o mar agora consumir mais sedimentos do que aqueles que produz, a alimentação de sedimentos na orla costeira depende principalmente dos sedimentos acumulados na plataforma continental, que foram transportados intensamente pelos rios durante os períodos de abaixamento do nível do mar durante o Plistocénico. O défice de areias resultante do esgotamento das fontes sedimentares atuais, juntamente com a extração de materiais inertes na zona costeira e nas bacias hidrográficas, parece ter um papel significativo na migração das praias para o interior (Loureiro, 2006).

Ondas

Um dos principais agentes transformadores da zona costeira é a ondulação. A costa portuguesa é caracterizada por uma agitação marítima intensa que pode ser atribuída a vários fenómenos, nomeadamente a ondulação. São causadas pela transferência de energia cinética da atmosfera para a superfície do oceano, o que resulta em uma elevação e depressão da camada superficial da água. A refração das ondas inicia-se e prolonga-se à medida que se aproximam da costa e começam a ficar gradualmente mais paralelas à linha de costa. Quando a profundidade reduz, o comprimento da onda e a sua velocidade diminuem, mas a sua energia mantém-se dentro de uma área menor, fazendo com que a sua altura aumente.

A costa noroeste de Portugal está exposta à ondulação gerada no Atlântico Norte, apresentando valores de altura (H) e períodos (T) superiores aos que ocorreriam pela simples ação do vento local. Durante o outono, inverno e primavera, estas condições de agitação marítima estão associadas a áreas de geração no flanco NE do Anticiclone dos Açores ou a situações com circulação de NO pós-frontal ou depressionária. Como resultado, as ondas apresentam alturas com cerca de 2,5 metros e períodos de 9

segundos. No verão, as ondas de NO estão associadas às condições meteorológicas características da época e ao regime de nortada. Assim as ondas apresentam alturas com 1 a 1,5 metros e 7 a 8 segundos de período (Loureiro, 2006).

Todo este processo leva a mudanças abruptas na morfologia, principalmente em praias arenosas. A ocorrência de forte ondulação, principalmente em períodos de tempestade que coincidam com períodos de preia-mar e com cheias fluviais e com ventos fortes, podem ter consequências catastróficas (Einsele, 2000; Loureiro, 2006).

Marés e correntes de marés

As marés correspondem ao fenómeno oscilatório descrito por grandes massas oceânicas acima e abaixo dos seus níveis médios. Resultam da atração gravítica exercida na Terra pela Lua e, apesar de ser em menor escala, pelo Sol. As marés mais intensas correspondem ao perigeu da Lua – altura em que a Lua está mais próxima da Terra, e menos intensas durante o apogeu – altura em que a Lua está mais afastada da Terra (Mantellato, 2012).

Durante um dia completo, existem dois regimes de maré alta e dois regimes de maré baixa e propagam-se de sul para norte.

Nas zonas estuarinas, lagunares e na foz dos rios, as correntes geradas pelas marés são fundamentais para a dinâmica sedimentar das praias. Essas correntes são caracterizadas por movimentos horizontais de massas de água que acompanham as variações do nível do mar, sendo influenciadas pela rotação da Terra, pelas características da maré que atinge a costa, pela batimetria e pela configuração da costa. A amplitude das marés oscila entre 1 metro de altura em marés menos intensas e entre 4 metros de altura nas marés mais intensas. A Figura I - 2 demonstra a diferença entre a preia-mar e baixa-mar na Praia da Bonança, Esposende. As correntes de maré de enchente e vazante desempenham um papel crucial na circulação e distribuição de sedimentos em estuários, lagunas e praias arenosas, contribuindo para a formação de bancos arenosos (Loureiro, 2006).



Figura I - 2: Amplitude da altura das marés na Praia da Bonança (fotografias captadas pelo autor a 6 e 7 de abril de 2023) (valores de maré referentes à altitude acima do zero hidrográfico do Porto de Leixões).

Correntes costeiras

As correntes geradas pelas ondas desempenham um papel crucial na dinâmica sedimentar das praias, podendo ser classificadas em longitudinais, transversais e correntes de fluxo-refluxo. Essas correntes costeiras têm uma grande capacidade de transporte, movimentando partículas de argila, limo, areia, areão e até mesmo seixos, através de processos como suspensão, saltação e tração. Quando as ondas atingem a costa e quebram, a energia liberada é suficiente para mover os sedimentos, que são transportados pelas correntes de fluxo e refluxo da onda, correntes de retorno e pela deriva litoral.

No litoral de Esposende, a deriva litoral predominante é de norte-sul, mas nas áreas próximas à foz dos rios Cávado e Neiva, ocorre a deriva litoral de sul-norte, devido à difração das ondas causada pela presença de deltas de maré vazante (Loureiro, 2006).

Ventos

Os ventos, no geral, são gerados pela variação de temperatura na atmosfera terrestre, que é causada pela radiação solar. Essas diferenças de temperatura resultam em variações de pressão atmosférica, o que leva ao movimento do ar entre diferentes camadas de ar, fluindo de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão, como anticiclones e depressões (J. V. C. Santos & Lima, 2016).

A direção do vento é crucial para a forma e orientação das dunas costeiras. Quando o vento sopra perpendicularmente à costa, as dunas tendem a formar-se paralelamente à linha de costa. Por outro lado, quando o vento sopra obliquamente em relação à costa, as dunas tendem a formar-se em ângulo com a costa. A velocidade do vento também influencia a altura e a forma das dunas, uma vez que ventos fortes e persistentes tendem a criar dunas mais altas e íngremes. As dunas costeiras desempenham um papel importante na proteção da linha de costa contra a erosão causada pelas ondas do mar e na estabilização das áreas costeiras.

O deslocamento das correntes de ar atmosférico desempenha um papel crucial na configuração de uma praia, já que afeta não apenas a formação de ondas e correntes, mas também a construção de dunas e cordões de areia. O vento é fundamental no transporte de areia e é responsável pela criação de diferentes tipos de dunas. No entanto, sua capacidade de transporte é limitada pela granulometria da areia e pela velocidade do vento ao longo da costa. Quanto mais fina a areia e mais forte o vento, mais facilmente ocorre o transporte da areia (Maia, 2021).

Tempestades

A ocorrência de tempestades aumenta a amplitude de todas as situações anteriores. A subida do nível do mar em períodos de tempestades levará a consequências mais dramáticas. De acordo com Paskoff (2001), ventos com velocidades de 80 km/h durante um período de 12 horas pode causar uma elevação de 1 metro no nível do mar. Em praias de areia, essas elevações podem causar inundações e mudanças morfológicas significativas, como a destruição de dunas e o recuo acentuado das arribas.

Já em praias de seixos, tempestades podem gerar cristas de seixos com grande altura e aumentar significativamente a inclinação da face da praia (Loureiro, 2006).

Barragens e outras intervenções nas bacias hidrográficas

Tal como referido anteriormente, a erosão costeira não tem apenas causas naturais. A atividade antropogénica tem uma clara influência na erosão costeira, e umas das principais causas antropogénicas da erosão costeira é a construção de barragens.

A construção de barragens, seja para uso agrícola, abastecimento de água ou energia, tem um impacto significativo na disponibilidade de sedimentos para as áreas costeiras. Embora inicialmente a construção possa aumentar o fluxo sedimentar a jusante, devido à escavação de grandes quantidades de terra, os efeitos a longo prazo são notáveis, já que a barragem age como um "filtro" que retém os sedimentos nas águas da albufeira, reduzindo assim a sua capacidade de transporte. Isso significa que os sedimentos mais grosseiros trazidos pelas linhas de água ficam presos no início das albufeiras e as águas a jusante acabam por ter uma deficiência de sedimentos, o que depois afeta as áreas costeiras (Dias, 1993).

Além disso, o caudal reduzido e a menor competência do rio implicam uma menor capacidade de transporte de sedimentos, o que significa que os sedimentos mais grosseiros são depositados mais cedo, em zonas mais a montante da bacia hidrográfica. Como resultado, menos sedimentos atingem a orla costeira, o que pode ter consequências negativas na dinâmica costeira (Loureiro, 2006).

Além das barragens, existem outras atividades humanas nos cursos dos rios ou nas bacias hidrográficas que interferem com o aporte de sedimentos ao litoral. A exploração de inertes tem um impacto significativo na perda de sedimentos costeiros, uma vez que muitas vezes requer dragagens extensivas de solo, minérios e massas sedimentares. Essa prática pode levar a um desequilíbrio dinâmico nos teores sedimentares (Loureiro, 2006).

As dragagens são outro fator que pode causar processos de erosão costeira. Podem ter impactos significativos no ecossistema estuarino, afetando a qualidade da água, a diversidade de espécies e a dinâmica do sedimento. A remoção de sedimentos finos e argilosos, por exemplo, pode aumentar a turbidez da água e prejudicar a fotossíntese das plantas aquáticas, afetando a cadeia alimentar. Também pode haver mudanças na dinâmica das correntes e na morfologia do estuário, alterando habitats de espécies e causando erosão ou deposição excessiva de sedimentos em certas áreas. Por isso, é importante que as dragagens sejam realizadas de forma responsável, com avaliação prévia dos impactos ambientais e implementação de medidas mitigadoras (Dias, 1993).

Ocupação da orla costeira

Nas últimas décadas, o desenvolvimento costeiro tem aumentado em Portugal e em todo o mundo causando impactos significativos nos sistemas de dunas e praias. Esses sistemas são a melhor defesa natural contra inundações costeiras, por isso a sua preservação é de elevada importância, mas a pressão antrópica tem levado à sucessiva destruição dos sistemas dunares.

O pisoteio das dunas e a consequente destruição das áreas vegetadas cria condições para a formação de corredores eólicos, facilitando a ocorrência de galgamentos marinhos.

A utilização dos solos costeiros para práticas agrícolas provoca o aumento da escorrência devido às regas das zonas agrícolas, potenciando fenómenos de ravinamento.

A construção de edifícios nos topos das arribas é a ocupação antrópica da orla costeira mais impactante, contribuindo para a impermeabilização dos solos, removendo a capacidade de defesa natural e de regeneração dunar.

Obras de defesa e engenharia costeira

No contexto de erosão costeira, a partir dos meados do séc. XX as obras de proteção costeira começaram a surgir por todo o mundo. Apesar de constituírem alguma defesa temporária, no geral, acabam por agravar ainda mais a situação de erosão costeira, conduzindo a consequências graves nos segmentos costeiros em que estão inseridos e nos segmentos adjacentes. Só o simples facto de muitas dessas obras, tais como esporões, paredões, enrocamentos e quebra-mares, serem estáticas e rígidas, e terem sido construídas num ambiente profundamente dinâmico (a linha costeira), representa um grande problema, principalmente na reflexão, refração e difração das ondas (Loureiro, 2006). Além disso, muitas das obras de engenharia costeira não foram planeadas conforme o ambiente costeiro em que iriam ser implementadas, tendo sido aplicadas de forma igual em localizações diferentes.

A falta de planeamento adequado levou à implementação apressada de muitas obras pesadas, o que resultou em vários projetos mal planeados.

Em relação aos seus impactos, as obras de defesa costeira estão incluídas em dois grupos: (1) os impactos relacionados com as obras longitudinais (paralelas à costa) e (2) os impactos relacionados com as obras transversais, nomeadamente os esporões (perpendiculares à costa) (Nunes, 2017).

Nas obras longitudinais, os seus impactos relacionam-se com o efeito reflexivo da obra sobre a onda favorecendo a retirada de sedimentos que estão junto à obra, transportando-os para o leito do mar.

Porém, perde-se o efeito dissipativo da praia natural e aumenta a tendência das ondas descarregarem a sua energia na própria obra, acelerando a sua degradação (ANPC, 2010).

As obras de defesa construídas perpendicularmente à costa, apesar de serem eficazes contra a erosão costeira a barlavento, provocam problemas de erosão a sotavento (Figura I - 3). Isso ocorre porque o transporte de sedimentos na costa oeste de Portugal ocorre predominantemente de norte para sul, e as obras de defesa perpendiculares tendem a fixar os sedimentos a norte da estrutura, criando um déficit sedimentar imediatamente a sul.

Além disso, as obras de defesa perpendiculares podem ser vulneráveis a tempestades de sudoeste, que podem inverter correntes de deriva e para as quais a maioria das obras não está dimensionada. Isto sugere que, embora as obras de defesa perpendiculares possam ser uma opção viável para a proteção da costa em algumas situações, é importante considerar cuidadosamente os efeitos colaterais potenciais dessas estruturas e dimensioná-las adequadamente para lidar com condições extremas, como tempestades de sudoeste (ANPC, 2010).

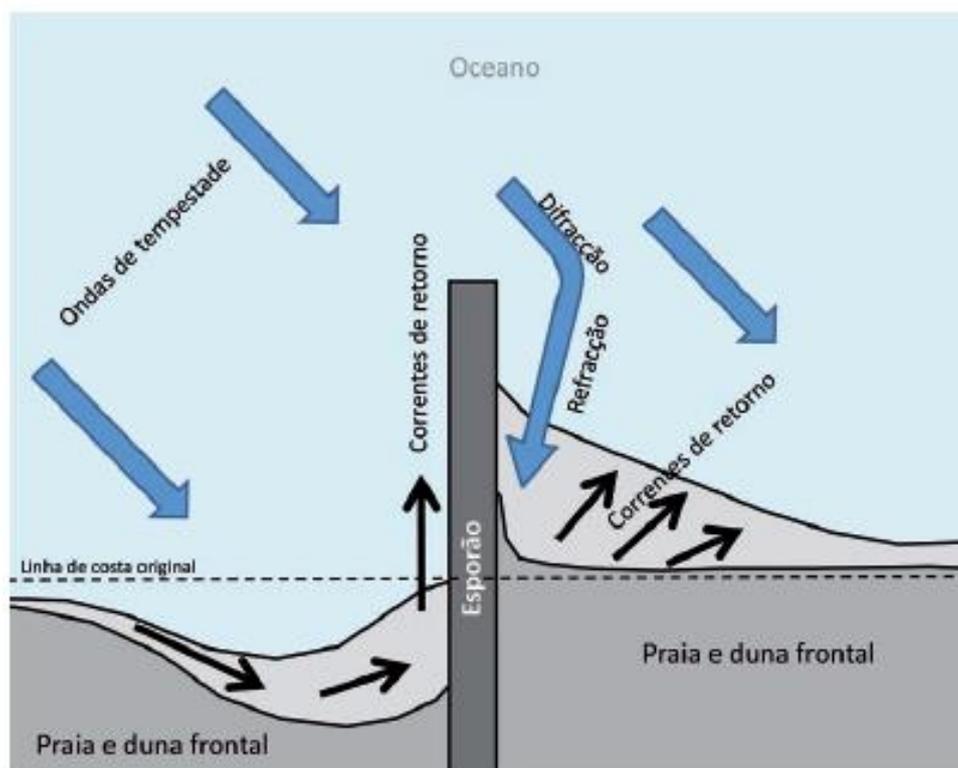


Figura I - 3: Ondulação incidente num esporão transversal em condições de tempestade de inverno.
(Fonte: ANPC, 2010)

1.1.2. Consequências

As consequências da erosão costeira não são apenas naturais, a sociedade e a economia também sofrem graves consequências, principalmente se se considerar que 60% da população mundial vive em zonas costeiras e que estas são zonas fundamentais para o desenvolvimento social e económico.

Consequências sociais

Prever os potenciais efeitos sociais da erosão costeira é uma tarefa complicada, já que eles são amplamente determinados pela abordagem adotada para enfrentar a erosão. Contudo, alguns efeitos da erosão costeira têm vindo a ser estudados.

No que diz respeito aos valores recreativos, as áreas costeiras desempenham um papel importante na vida das sociedades, principalmente naquelas mais costeiras e são frequentemente valorizadas pelas atividades recreativas que oferecem. Essas atividades recreativas (banho de sol, piquenique, natação, surf, pesca, navegação, mergulho, etc.) podem ser afetadas se as praias existentes forem reduzidas em largura ou desaparecerem completamente (B. C. Carvalho & Guerra, 2020).

Em relação à desigualdade social, os esforços de proteção costeira geralmente têm menos valor em regiões rurais não desenvolvidas, e, por outro lado, mais valor em regiões com estruturas de desenvolvimento, como cidades ou zonas turísticas. As obras de proteção costeira são, portanto, mais propensas a serem priorizadas em áreas com maior interesse social/económico. Isso pode levar à desigualdade em áreas com valores de terra mais baixos (geralmente áreas com características socioeconómicas mais baixas, áreas rurais e áreas de conservação), onde os moradores estarão em maior risco dos efeitos sociais do deslocamento.

A erosão costeira pode levar a tensões políticas e sociais e podem surgir como resultado das medidas adotadas para enfrentar a erosão costeira. Por exemplo, o grande investimento necessário em áreas costeiras pode não ser considerado uma resposta económica apropriada por pessoas que vivem em regiões do interior (B. C. Carvalho & Guerra, 2020; Charlier et al., 2005; Warner et al., 2019).

Ao nível cultural, muitos países têm fortes ligações religiosas com o litoral, onde se encontram, em muitos casos, capelas, templos, locais de oração, etc. A destruição de património religioso leva à perda de tradições religiosas, o que representa, geralmente, um forte impacto, principalmente em pequenas comunidades costeiras .

No que diz respeito ao bem-estar da comunidade, muitos dos efeitos sociais mencionados acima podem afetar o bem-estar da comunidade como um todo. No entanto, um impacte positivo no bem-estar da

comunidade resultante da erosão costeira pode ser um aumento no empoderamento e visibilidade de determinadas comunidades. No caso dos desalojamentos, estes também podem contribuir para problemas de sobrelotação em regiões mais interiores, sendo importante ter em conta que os fenómenos de sobrelotação têm um efeito em cascata na saúde.

Em relação à saúde, as populações com habitações em zonas de risco de inundação costeira vivem com maiores níveis de incerteza e stress, levando a problemas de saúde mental, incluindo ansiedade, depressão e suicídio. Estes efeitos poderão surgir devido à perda de propriedades, de locais históricos e culturais de valor (B. C. Carvalho & Guerra, 2020; Charlier et al., 2005; Warner et al., 2019).

Consequências económicas

Para além das consequências sociais, nalguns casos, a erosão costeira provoca graves consequências económicas, não apenas nas zonas costeiras, mas em nações completas.

Os impactos económicos da erosão costeira podem levar à perda de produtividade, propriedade e terreno. Quando a erosão afeta as propriedades, o valor ou preço da propriedade pode diminuir, dificultando aos proprietários a obtenção de seguros ou hipotecas. Se as obras de proteção costeira não forem efetuadas ou não contribuírem com os resultados esperados, as pessoas podem não ter meios para reparar ou demolir os bens danificados, resultando numa perda de propriedade. Isto pode também levar a custos associados à relocalização ou à compra/aluguer de outra casa (Melvin *et al.*, 2017).

As indústrias como a pesca e a aquacultura podem também ser afetadas pela erosão costeira, sendo que este fenómeno pode danificar as zonas húmidas costeiras e alterar a qualidade da água. Além disso, as comunidades dependentes do turismo costeiro podem sofrer uma diminuição das receitas turísticas. A produtividade reduzida das empresas que dependem de infraestruturas eventualmente afetadas pela erosão, ou que incorrem em custos para mitigar a erosão, pode ter um *efeito dominó* na economia local (de Schipper *et al.*, 2020).

A erosão costeira pode também comprometer o desempenho dos sistemas de drenagem de águas superficiais e pluviais em povoações costeiras de baixas altitudes e danificar infraestruturas de transporte, incluindo estradas e ferrovias. As alterações na sedimentação em torno da linha costeira podem afetar as rotas de navegação, e as ecovias e ciclovias costeiras podem também estar em risco, sendo que estes danos nas infraestruturas representam custos para a comunidade, uma vez que requerem a redistribuição de fundos públicos para a proteção contra os riscos de inundação, reparação e melhoramento das infraestruturas, em caso de catástrofe (Semeoshenkova & Newton, 2015; Wang *et al.*, 2021).

Em todo o mundo, os governos são responsáveis por centenas ou até milhares de estruturas de proteção costeira existentes, tais como tubos de areia, paredões, e revestimento de rochas. No entanto, estas estruturas apresentam idades muito variadas, em diferentes estados de conservação, e com períodos de vida útil também muito diversificados, pelo que, atualmente, o seu estado e a sua provável longevidade efetiva não têm tido em conta a subida do nível do mar. Isto exigirá a sua adequação, nomeadamente a elevação das alturas da estrutura para se manterem eficazes, ou até a sua realocação, nos casos mais severos, o que poderá levar a gastos dispendiosos e, nos países com economias mais frágeis, a gastos inatingíveis (Al-Mutairi *et al.*, 2021; Satta *et al.*, 2017; Semeoshenkova & Newton, 2015).

1.1.3. Panorama Nacional

O litoral de Portugal é muito valioso em termos naturais, económicos e culturais, e a sua importância é amplamente reconhecida. No entanto, a grande variedade de atividades que ocorrem na zona costeira frequentemente causa conflitos de interesses, o que leva a estratégias de intervenção opostas. Como resultado, o sistema costeiro tem vindo a deteriorar-se ao longo de várias décadas, em grande parte devido à erosão costeira. Em alguns casos, esta degradação atinge proporções preocupantes e pode mesmo comprometer grandes áreas do litoral. Na costa de Portugal continental, a crescente ocupação humana muitas vezes entra em conflito com a dinâmica natural da zona costeira, resultando em numerosas situações de conflito que se tornam cada vez mais frequentes (F. D. Santos *et al.*, 2014).

A construção de barragens é considerado um dos principais fatores responsáveis pela redução do fornecimento de sedimentos para a costa. Estima-se que atualmente as barragens retenham mais de 80% dos volumes de areias que antes eram transportadas pelos rios (Valle, 2014). Isso ocorre porque a construção das barragens retém os sedimentos na albufeira (Abecassis, 1997) e também regula as velocidades do rio, diminuindo o efeito das cheias (Santos Ferreira & Santos, 2014). Além disso, a extração de areias no domínio hídrico também é um fator significativo que contribui para o défice sedimentar na costa. Em 2003, um estudo promovido pelo então Instituto da Água mostrou que cerca de um terço das areias utilizadas na construção civil e obras públicas foram obtidas no domínio hídrico. Entre 54% a 66% dos inertes extraídos em portos, e o restante extraído no rio Tejo. Os portos sob jurisdição do IPTM, juntamente com o Porto de Aveiro, comercializaram cerca de 2,5 milhões de metros cúbicos de areias por ano. Isso evidencia a relevância da extração de areias no balanço sedimentar costeiro.

A linha de costa de Portugal Continental estende-se da foz do rio Minho até à foz do rio Guadiana, representando uma extensão total de 987 km, constituída por uma grande diversidade de ambientes morfossedimentares, onde se incluem praias, arribas, estuários, lagoas e ilhas barreira. Entre os tipos de ambientes costeiros mais comuns em Portugal, as arribas rochosas cobrem 48% da linha costeira, seguidas do litoral baixo e arenoso com 42% da linha de costa total. O litoral baixo rochoso e as arribas brandas correspondem, respetivamente, a 8% e a 2% da linha de costa portuguesa (Ferreira & Matias, 2013) (Figura I - 4).



Figura I - 4: Tipos de ambiente costeiro em Portugal Continental.
Fonte: APA (2016)

Os 987 km de extensão da linha de costa portuguesa, produzem 85% do PIB nacional e 26% da faixa litoral portuguesa está ocupada por atividades antrópicas, como centros urbanos, o turismo e a indústria. Com esta enorme pressão antrópica, 80 km da linha de costa (8%) já está protegido por obras de proteção/defesa. Em Portugal, 180 km de linha de costa está a sofrer graves processos de erosão costeira, correspondendo a cerca de 20% da linha de costa total num total de 12,2 km² de perda de território entre 1958 e 2010 (APA, 2016). A Figura I - 5 mostra os segmentos da linha de costa em situação de erosão costeira.

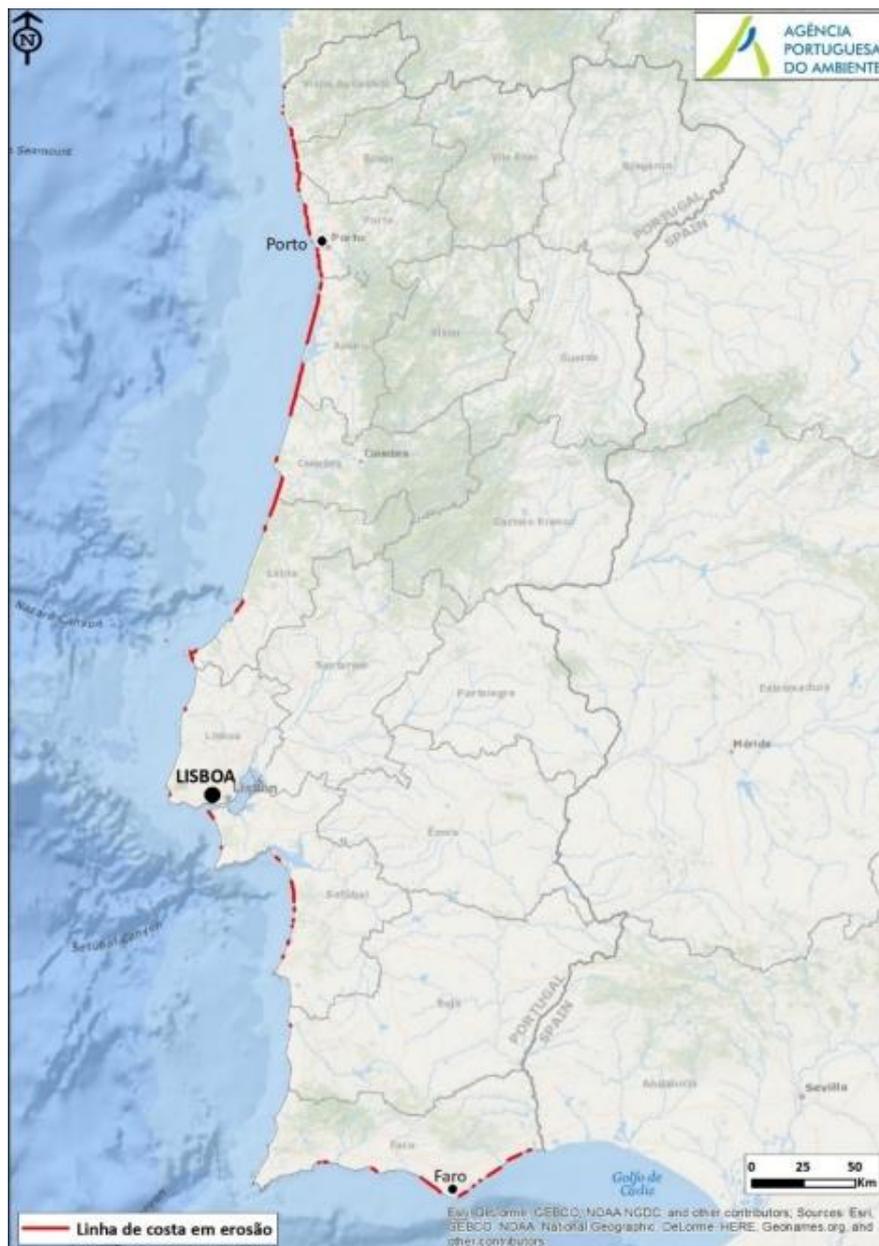


Figura I - 5: Linha de costa em situação de erosão costeira em Portugal Continental.
Fonte: APA (2016)

1.1.4. Medidas de Adaptação à Erosão Costeira em Portugal

O planeamento e gestão da faixa costeira devem ser baseados em conhecimentos científicos e técnicos, sólidos e atualizados sobre os padrões de evolução de longa duração e ritmos de evolução sazonal. A Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira (ENGIZC) identifica o conhecimento científico e técnico como um valioso mecanismo para a interpretação integrada da evolução da zona costeira e como dimensão de suporte à decisão. A ENGIZC entende a *“monitorização das zonas costeiras como um dos seus objetivos transversais, sendo um dos seus objetivos temáticos “Antecipar, prevenir e gerir situações de risco e de impactos de natureza ambiental, social e económica”* (Resolução do Conselho de Ministros n°82/2009, de 8 de setembro).

Atualmente discute-se sobretudo a proteção das zonas costeiras e a redução e gestão dos riscos costeiros. Com o aumento da notoriedade das mudanças climáticas é cada vez mais frequentemente a utilização da expressão de adaptação às mudanças climáticas. A expressão “adaptação” é mais abrangente e adequada, dado que inclui não só a proteção e o combate, mas também outro tipo de respostas como a acomodação, recuo planeado, ou realocização (F. D. Santos *et al.*, 2014).

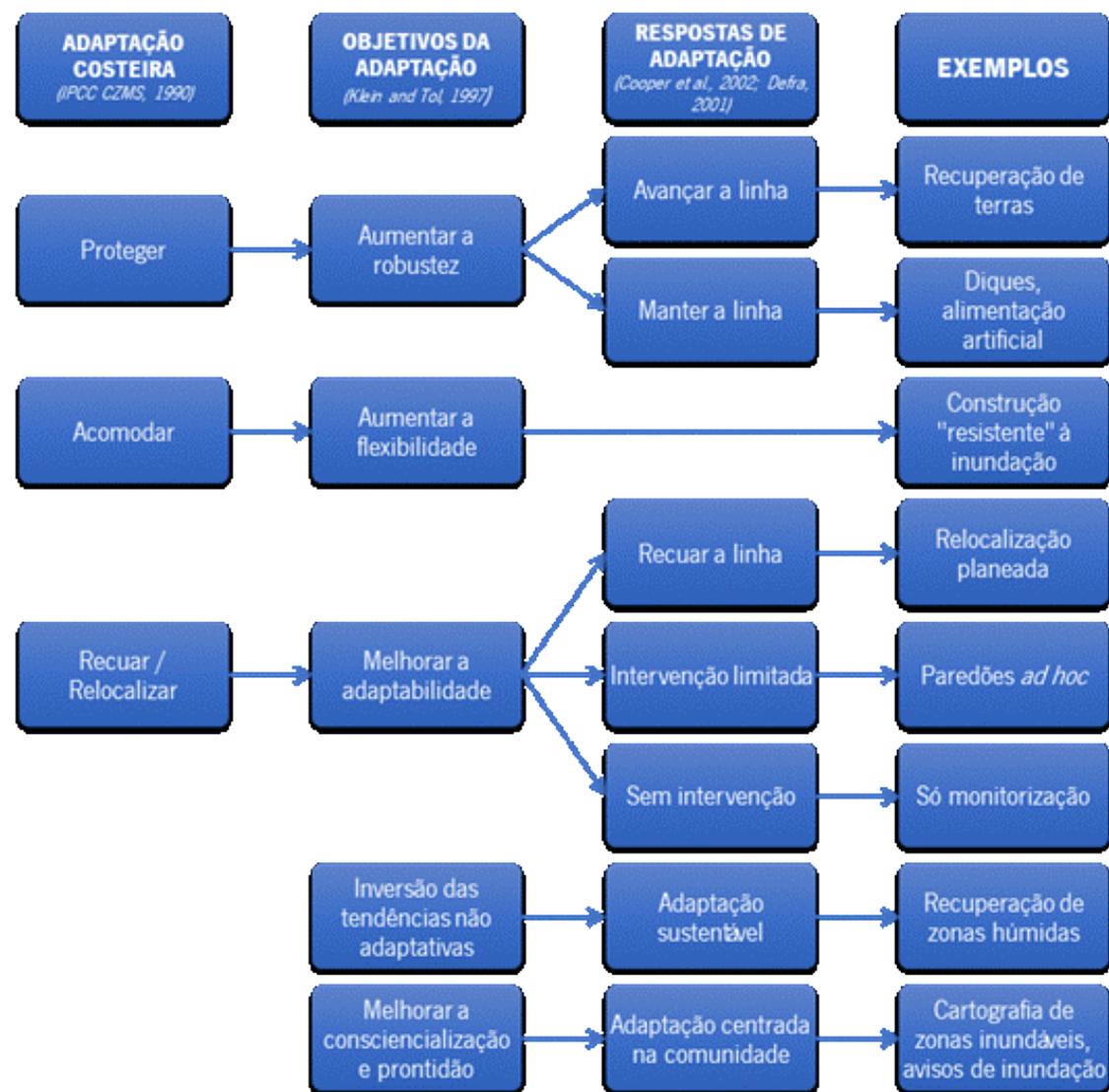
De uma forma geral, as principais opções para adaptação nas zonas costeiras são (1) a proteção com vista a reduzir o risco associado aos impactos das mudanças climáticas; (2) a acomodação para aumentar a capacidade das populações lidarem com os impactos da erosão costeira) e (3) o recuo para redução dos riscos dos eventos extremos provocados pela mudanças climáticas (F. D. Santos *et al.*, 2014). A Tabela I - 1 dá vários exemplos de medidas “leves” e “pesadas” nas três estratégias de adaptação.

	PROTEGER “esforço para continuar a usar áreas vulneráveis”	ACOMODAR “esforço para continuar a viver em áreas vulneráveis, alterando os hábitos de vida e trabalho”	RECUAR “esforço para abandonar áreas vulneráveis”
Pesada	Diques, paredões, esporões, quebra-mares, barreiras contra a intrusão salina	Construção em estacas, adaptação dos sistemas de drenagem, abrigos de emergência para cheia	Relocalização de edifícios ameaçados
Leve	Alimentação artificial, construção de dunas, recuperação ou criação de zonas húmidas	Novos códigos de construção, culturas agrícolas tolerantes ao sal ou a inundações, alertas de risco e evacuação, seguros baseados no risco	Restrições no uso do solo, zonas tampão

Tabela I - 1: Medidas "leves" e "pesadas" de adaptação.

Fonte: Adaptação de Santos *et al.* (2014)

Os conceitos e as metodologias de adaptação do litoral à erosão costeira têm evoluído bastante com base num melhor conhecimento dos impactes potenciais, da qualidade das observações e do desenvolvimento de novas tecnologias de acomodação e proteção. O Quadro I - 1 resume essa evolução desde o início da década de 1990.



Quadro I - 1: Evolução das práticas da adaptação planeada das zonas costeiras

Fonte: Santos *et al.* (2014)

1.1.5. Estado Atual do Conhecimento Científico sobre a Erosão Costeira

A investigação científica sobre a erosão costeira evoluiu consideravelmente nas últimas décadas. Inicialmente, a pesquisa sobre a erosão costeira era principalmente empírica, baseada na observação e na coleta de dados. Os cientistas estudavam a erosão costeira em áreas específicas e analisavam os efeitos dos processos naturais e humanos no ambiente costeiro.

Com o avanço da tecnologia e da compreensão dos processos físicos e biológicos que influenciam a erosão costeira, a pesquisa tornou-se mais sofisticada e interdisciplinar. Os cientistas agora usam uma combinação de métodos de campo, laboratório e modelação numérica para estudar a erosão costeira. Para este subtópico, de forma a compreender a evolução do conhecimento científico sobre a erosão costeira, foi feita uma análise bibliométrica. Este tipo de análise quantitativa fornece dados sobre a estrutura intelectual do domínio do conhecimento e o atual estado, bem como os tópicos quentes e as tendências de investigação nesta temática (Arora & Chakraborty, 2021; Kapoor *et al.*, 2018; Mishra *et al.*, 2017).

Para juntar a informação bibliográfica da literatura publicada foi utilizada a base de dados da *Web of Science* (WoS), sendo que esta é uma base de dados muito abrangente e oferece uma grande cobertura do trabalho académico global nas mais variadas áreas do conhecimento científico, para além de ter uma ampla coleção de milhares de revistas indexadas.

De forma a agregar os dados desejados foi utilizada a expressão "*coastal erosion*" OR "*shoreline change*" OR "*coastline change*". De seguida, de forma a filtrar os resultados foram utilizados alguns critérios. O primeiro critério foi a data das publicações, tendo sido apenas analisados os documentos a partir de 1990 até 2022. De realçar que esta pesquisa foi feita no dia 20 de março de 2023, e por isso não se incluíram as publicações de 2023 devido ao facto de 2022 ter sido o último ano completo. O segundo critério foi o tipo de publicações, sendo que esta análise engloba apenas os documentos do tipo *Article* (Artigo), *Proceeding Paper* (textos em Atas de congressos) e *Review Articles* (Artigos de revisão). A filtração dos dados por estes critérios resultou em 5763 documentos.

Relativamente ao número de publicações, a Figura I - 6 demonstra o forte crescimento da investigação científica nesta área do conhecimento, sendo que a média de publicações desde 1990 até 2022 é de 174.6 publicações por ano, e, nos últimos dez anos de análise, essa média é de 391.5 publicações por ano, ou seja, mais do dobro.

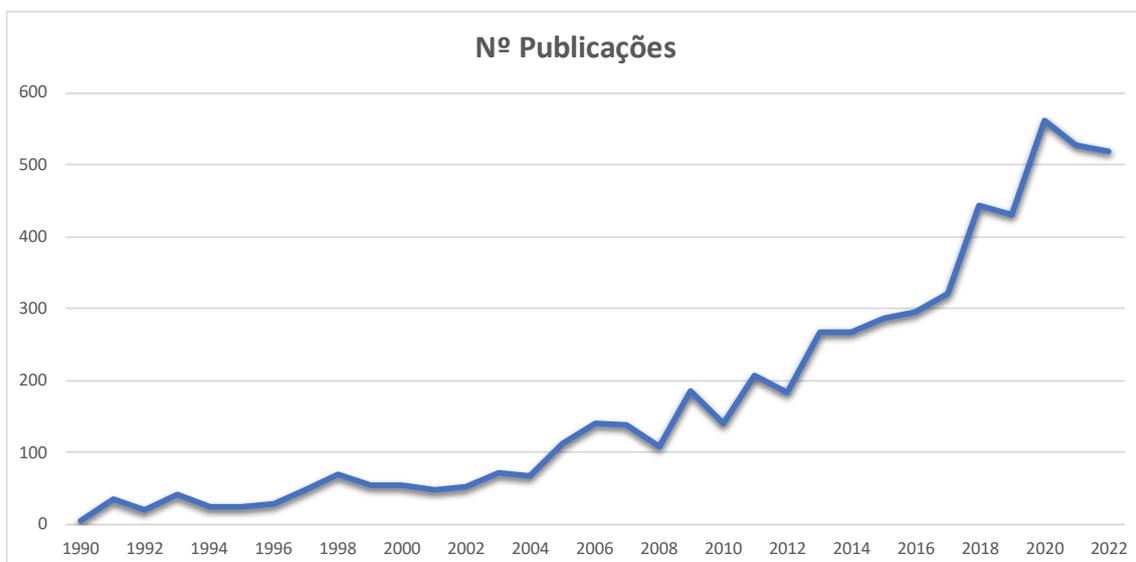


Figura I - 6: Nº de publicações científicas sobre erosão costeira.
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Web of Science*.

Relativamente aos países com mais publicações, os Estados Unidos lideram com bastante destaque, com 1240 publicações desde 1990, conforme se pode verificar na Figura I - 7. Estes dados revelam a preocupação americana em combater a erosão costeira, muito devido ao facto de nesse país existir muita construção muito próxima à linha de costa. Dos 15 países com mais publicações, 7 são países europeus, demonstrando a erosão costeira é um problema também noutros países da Europa.

Entre 1990 e 2022 foram produzidas em Portugal 196 publicações, o que representa 3.4% do total mundial. Apesar disso, é o 13º país do mundo com mais publicações nesta temática e o 6º país da Europa, indicando o impacto que a erosão costeira tem para o nosso país, bem como os esforços que têm sido feitos para estudar e minimizar os impactos deste fenómeno.

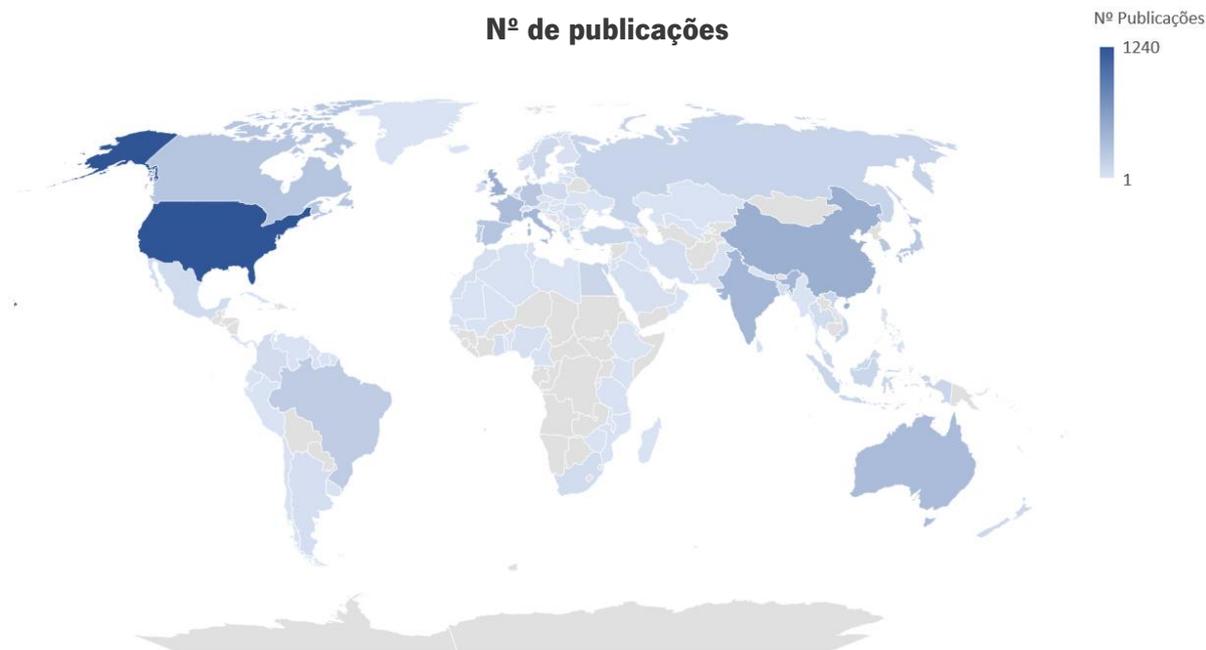


Figura I - 7: Distribuição mundial das publicações científicas sobre erosão costeira.
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Web of Science*.

1.2 Monitorização da Erosão Costeira

A monitorização da erosão costeira envolve a observação e medição sistemática de alterações na forma, tamanho e posição da linha de costa ao longo do tempo. O processo de erosão costeira é um fenómeno natural, mas também pode ser agravado por atividades humanas, como a construção, dragagem e desflorestação. As zonas costeiras estão sujeitas a uma grande movimentação, o que torna essencial ter um conhecimento aprofundado das características naturais do local, acompanhando a sua evolução ao longo do tempo e identificando os fatores que afetam sua mobilidade e dinâmica (Alesheikh *et al.*, 2007). Para entender as possíveis mudanças e prever a sua evolução no futuro, é necessário obter um profundo conhecimento dos processos envolvidos e a capacidade de medir com precisão os indicadores de mobilidade costeira para quantificar as mudanças. É importante lembrar que há margem para erros e incertezas em qualquer previsão ou projeção de cenários evolutivos. A monitorização e medição da mobilidade dos indicadores de dinâmica costeira são importantes para identificar, quantificar e compreender os seus fatores condicionantes, determinar a duração de atuação dos processos, estabelecer relações com fatores climáticos e meteorológicos, tentar prever a evolução, prestar apoio a operações de planeamento e ordenamento e avaliar os impactos positivos e negativos das operações de planeamento e ordenamento (Henriques, 2006). Para um programa de monitorização eficaz, é necessário reunir uma ampla gama de dados, como cartas, fotografia aérea, artigos e relatórios que

ajudem a compreender as características dos sistemas costeiros e os fatores que contribuem para a situação atual da região em estudo, incluindo informações sobre a ondulação, meteorologia, construção de obras costeiras e extração de areia (Alesheikh *et al.*, 2007; Henriques, 2006; Kale & Acarli, 2019).

A monitorização da erosão costeira é importante para a compreensão do impacto dos fatores de mobilidade costeira nos ecossistemas e comunidades costeiras, bem como para o planeamento e implementação de medidas para mitigar os efeitos da erosão (Holland *et al.*, 2009). É de extrema importância também porque fornece informação valiosa sobre como a linha costeira está a alterar-se ao longo do tempo. Esta informação pode ser utilizada para identificar áreas em risco de erosão e para desenvolver estratégias para mitigar os efeitos da erosão, tais como a alimentação da praia ou a construção de obras de defesa costeira. A monitorização pode também ajudar-nos a compreender as causas da erosão, tais como alterações no nível do mar ou aumento da atividade das tempestades, e como estes fatores podem estar a mudar ao longo do tempo (Bio *et al.*, 2015).

Ao longo das últimas décadas, vários métodos para a monitorização das alterações da linha de costa têm sido propostos. A faixa costeira pode ser analisada através da (1) dinâmica costeira e das (2) alterações da morfologia da praia (Boak & Turner, 2005).

Os levantamentos convencionais que utilizam equipamentos de topografia são caros, exigem muita mão-de-obra e geralmente não têm a resolução espacial e temporal necessária para identificar e quantificar mudanças de curto e longo prazo (Coward *et al.*, 2010; Holland *et al.*, 2009; Muehe, 2011; Short & Trembanis, 2004; Souza & Luna, 2010). Os tradicionais levantamentos topográficos com recurso a GPS e Estação Total estão a entrar em desuso devido ao surgimento de ferramentas mais práticas, baratas e que apresentam resultados de maior qualidade, como os drones e o LiDAR. Apesar disso, os levantamentos topográficos continuam a desempenhar um papel fundamental na monitorização costeira. Permitem a deteção de alterações na morfologia das praias, identificando as áreas de maior risco e as que necessitam de mais intervenção. Em relação às dunas de areia, a topografia permite analisar em que locais ocorre erosão e em que locais estão a surgir novas dunas e o mesmo se sucede nas falésias. A monitorização topográfica dos estuários e das bocas dos rios são um elemento importante na avaliação da saúde dos ecossistemas costeiros. A popularização dos métodos de GPS, especialmente aqueles que usam RTK GPS, facilitou a análise da variabilidade espacial, permitindo a rápida recolha de dados de elevada precisão em levantamentos tridimensionais de alta resolução espacial (Barnard & Warrick, 2010; Rocha *et al.*, 2009).

Outra opção é usar a deteção remota, como o radar de satélite, nomeadamente o *Synthetic Aperture Radar* (SAR), que pode ser utilizado para extrair informações da costa (Niedermeier *et al.*, 2000). As

imagens de satélite são uma boa solução para quem faz análises de áreas mais extensas, devido à enorme cobertura deste tipo de imagens (Saito *et al.*, 2004). Contudo, as imagens de satélites trazem alguns entraves à sua utilização, incluindo o facto de que muitas imagens são inutilizáveis devido à presença de nuvens, e terem baixa resolução espacial, e, além disso, as imagens de satélite com melhor qualidade (com melhor resolução espacial) apresentam um custo muito elevado de aquisição (Tan *et al.*, 2019).

A fotografia digital aérea é utilizada para obter informações 3D através de análise fotogramétrica (Coward *et al.*, 2010; Fletcher *et al.*, 2003). A utilização dos drones assume-se como a mais eficaz, prática e com custos de utilização mais reduzidos. Estas características fazem com que o uso dos drones seja cada vez maior nas mais variadas áreas de conhecimento. Na última década, a utilização de drones como ferramentas de mapeamento 2D e 3D, topografia e medições sofreu um desenvolvimento significativo (Barry & Coakley, 2013; Haala *et al.*, 2012b; Vallet *et al.*, 2012), sendo que o seu potencial para estudos costeiros começou a ser concretizado devido ao facto de os drones produzirem resultados com elevada resolução espacial (J. A. Gonçalves & Henriques, 2015; Turner *et al.*, 2016). As principais vantagens dos drones relacionam-se com o baixo custo de aquisição e utilização (relativamente a outras ferramentas), a possibilidade de planear e preparar, de forma rápida, os voos no terreno com ajuda a pontos de controlo com apoio do GPS, o facto de a maioria dos drones transmitirem a imagem de imediato, o que permite que se repita o trabalho em caso de falha ou erro, e os baixos riscos de segurança em caso de acidente, devido principalmente ao peso, muitas vezes ligeiro, dos equipamentos (J. A. Gonçalves & Henriques, 2015).

Levantamentos com recurso a laser, nomeadamente o LiDAR, são a metodologia mais recente, e podem ser uma alternativa à fotografia aérea, oferecendo precisão vertical semelhante ou, na maior parte dos casos, até melhor. Contudo, ainda são extremamente caros (Bio *et al.*, 2015). LiDAR é normalmente utilizado no mapeamento de linhas costeiras em grande escala e na deteção de alterações, devido à sua elevada precisão geométrica, e velocidade de aquisição (Brock & Purkis, 2009). Um sistema LiDAR aerotransportado é basicamente composto por scanner a laser, GNSS em modo diferencial e Unidade de Medição Inercial (IMU). Os dados típicos de um levantamento LiDAR são uma nuvem de pontos tridimensionais (Petrie, 2011). A intensidade da luz refletida depende das características da superfície, comprimento de onda do laser e o ângulo de incidência (G. Gonçalves *et al.*, 2019).

Uma nova abordagem aos levantamentos topográficos é a cartografia móvel videogramétrica, que extrai coordenadas 3D de imagens de vídeo estéreo. As imagens de vídeo podem fornecer dados contínuos de

baixo custo e resolução temporal ideal, mas geralmente são limitados a pequenas áreas de praia (Archetti & Zanuttigh, 2010; Davidson *et al.*, 2007).

Outra técnica de monitorização costeira são os levantamentos batimétricos com recurso a SONAR e DGPS (Bio *et al.*, 2015). Os levantamentos batimétricos com recurso a SONAR permitem criar modelos de propagação de ondas e identificar afloramentos rochosos e manchas arenosas. No entanto, os autores não avaliaram a precisão dos levantamentos batimétricos. Em ambientes ideais, a precisão da medição da profundidade ronda os 15 cm.

1.3. Drones / Veículos Aéreos Não Tripulados

De acordo com a definição internacional do *Unmanned Vehicle System* (UVS), um veículo aéreo não tripulado ou drone é uma “aeronave” para operar sem piloto humano a bordo (<https://uvs-international.org/>). O termo simples drone corresponde a todo o sistema composto pelo veículo/plataforma aérea (drone) e a estação de controlo no solo (Sanna & Pralio, 2005).

No passado, o desenvolvimento de drones foi primariamente motivado por objetivos e aplicações militares. Como geotecnologia, a primeira experiência com drones foi realizada há três décadas, mas só recentemente a sua utilização tornou-se uma plataforma comum para a aquisição de dados (Nex & Remondino, 2014).

A necessidade de diminuição de tempo e custos nos procedimentos de obtenção de fotografia aérea, em conjunto com a evolução tecnológica de equipamentos de navegação e fotografia, ocasionou o surgimento de ferramentas alternativas aos métodos tradicionais (Vidal, 2013).

Os drones, quando equipados com sistemas de medição fotogramétrica, como os sensores LiDAR, câmaras fotográficas de pequeno ou médio porte, câmaras térmicas, multiespectrais e com infravermelhos, são uma ferramenta útil para mapeamento. Grande parte dos drones que se encontram no mercado apresentam especificações técnicas que permitem com que estes possam ser aplicados a levantamentos fotogramétricos. Além das câmaras e sensores especificados anteriormente, os drones atuais são também equipados com GPS, Unidade de Medição Inercial de Movimento (IMU), ligação rádio, um pequeno processador de computador (CPU), um sistema GNSS, altímetro barométrico e um sistema de bússolas (Gonçalves & Henriques, 2015).

1.3.1. Tipos de Drone

Em relação às tipologias de drones, estes podem ter dois tipos a nível estrutural, drones de asa fixa e drones de asa rotativa. Na Tabela I - 2 estão demonstradas as principais diferenças entre estes dois tipos de drones.

Os drones de maior tamanho e com maior estabilidade, geralmente baseados num motor de combustão interna, apresentam, na sua maioria uma maior resistência em relação aos drones com motor elétrico e, graças à maior carga útil, permitem a utilização e câmaras de formato médio ou instrumentos LiDAR ou SAR a bordo (Berni, Zarco-Tejada, Suarez, González-Dugo, *et al.*, 2009; Grenzdörffer *et al.*, 2012; Kohoutek & Eisenbeiss, 2012; Nagai *et al.*, 2004; Vierling *et al.*, 2006; Wen-Qin Wang *et al.*, 2009).

	ASA ROTATIVA	ASA FIXA
Facilidade de manobra	+	-
Preço	+	-
Tamanho / Portabilidade	+	-
Facilidade de Utilização	+	-
Alcance / Economia	-	+
Estabilidade	+	+
Capacidade de Carga	+	-
Recuperação da Falha do Motor	-	+
Facilidade de descolagem e aterragem	+	-

Tabela I - 2: Principais diferenças nas características entre dois tipos de drones

Os desenvolvimentos e melhorias a nível de hardware e plataformas que têm sido feitos nas áreas da robótica, aeronáutica e ótica, procuram soluções inovadoras para diminuir o tamanho dos sistemas óticos, melhorar a carga útil, conseguir uma navegação completamente autónoma e melhorar os desempenhos de voo (Laycock & Handerek, 2008; Schafroth *et al.*, 2009). Os invertebrados voadores também têm sido objeto de estudo, de forma a compreender as suas capacidades de movimento, evitar obstáculos, ou capacidades autónomas de aterragem/descolagem (D. Moore, 2011; Franceschini *et al.*, 2007).

Os drones para aplicações geomáticas podem ser classificados de acordo com o seu motor e/ou sistema de propulsão (Nex & Remondino, 2014):

- Equipamentos sem motor, por exemplo o balão, papagaio, planador ou parapente;
 - Equipamentos com motor, tais como, aeróstato, planador, hélice, elétrico ou com motor de combustão;
- Em alternativa, os drones podem também classificados conforme as suas características aerodinâmicas e “físicas”, tais como:
- Mais leves que o ar, como o balão e o aeróstato;
 - Asa rotativa (elétrica ou com motor de combustão), como o mono-rotor, coaxial, quadrocóptero e multi-rotor.
 - Asa fixa (sem propulsão motriz, elétrico ou com motor de combustão), tais como o planador ou a asa alta.

1.3.2. Vantagens e Desvantagens da Utilização de Drones

Os drones têm recebido recentemente muita atenção, uma vez que são plataformas bastante baratas, com dispositivos de navegação/controlo e sensores de gravação para uma rápida produção de dados digitais. A grande vantagem dos sistemas de UAV reais é a capacidade de fornecer rapidamente informação de alta resolução temporal e espacial e de permitir uma resposta rápida em várias situações críticas onde o acesso imediato à geoinformação 3D é crucial (Nex & Remondino, 2014). Contudo, existem outras vantagens da utilização de drones, tais como (Mello *et al.*, 2022; Resop *et al.*, 2019; Tkáč & Mésároš, 2019):

- a sua utilização em situações de difícil acesso e de alto risco sem colocar em causa a integridade física do piloto ou de qualquer humano;
- a inexistência de restrições e limitações fisiológicas e económicas de pilotos humanos, tornando o seu uso mais económico;
- a capacidade de transmitirem e exibirem em tempo real a informação, tal como a sua rápida aquisição de dados;
- permitem a recolha de dados em dias com condições atmosféricas adversas;
- possibilidade de evitar as nuvens, sendo que os drones podem voar a altitudes baixas, ao contrário das aeronaves tripuladas ou satélites, que não o podem fazer devido à altitude necessária para o voo;
- para aplicações de pequena escala, o uso de naves tripuladas para obtenção de dados é insustentável, fazendo dos VANT a solução mais económica;
- a incorporação de sistemas GNSS/INS, de navegação e estabilização automáticas garantem a precisão, sobreposição e cobertura fotográfica, necessárias para a fotogrametria;
- maior rapidez no planeamento e na execução das missões (inferiores a 1 hora).

Apesar de serem uma tecnologia recente e apresentarem imensas vantagens que favorecem a sua utilização no mapeamento, os drones também apresentam desvantagens na sua utilização.

Os drones, especialmente os de baixo custo, limitam a carga útil do sensor em peso e dimensão, de modo que muitas vezes são selecionados sensores de baixo peso como câmaras amadoras de pequeno ou médio formato. Portanto, em comparação com as câmaras de grande formato, os drones com câmaras amadoras têm de adquirir um maior número de imagens a fim de obter a mesma cobertura de imagem e uma resolução de imagem comparável. Além disso, os sensores de baixo custo são normalmente menos estáveis do que os sensores de gama alta, o que resulta numa qualidade de imagem reduzida. Além disso, estas limitações de carga útil exigem a utilização de unidades de navegação de baixo peso, o que implica resultados menos precisos para a orientação dos sensores (Ji & Luo, 2019).

Os drones de baixo custo estão normalmente equipados com motores menos potentes, o que limita a altitude alcançável.

Os pacotes de software comerciais existentes dedicados ao processamento de dados fotogramétricos raramente são configurados para suportar imagens de drone, sendo na maior parte das vezes softwares de modelação 3D de objetos.

Para além destes inconvenientes, os drone não beneficiam das características sensoriais e inteligentes dos seres humanos. Assim, os drones não conseguem reagir como os seres humanos em situações inesperadas, por exemplo, o aparecimento inesperado de um obstáculo, apesar de que a evolução dos sensores de proximidade tem trazido bastantes melhorias (Ji & Luo, 2019).

Os drones de baixo custo não estão equipados com equipamentos de comunicação de tráfego aéreo e sistemas anticollisão, como as aeronaves tripuladas. Por conseguinte, devido à falta de comunicação com as autoridades de tráfego aéreo, os drones estão limitados ao voo em linha de vista e a operar com um piloto de reserva. Contudo, nesta temática, os drones têm registado uma evolução, sendo que os softwares que operam os drones já incluem as NFZ (*No Fly Zones*) impedindo que os drones atravessem áreas de risco para a segurança, como aeroportos, prisões, entre outros. O alcance de voo dos drones depende também, para além da regulação da linha de visão, da habilidade do piloto em detetar e seguir a orientação do sistema do drone.

Para tirar o máximo partido das impressionantes capacidades de voo dos drones, como os drones de asa rotativa totalmente automatizados, é necessário um piloto bem treinado, devido a questões de segurança. O piloto deve ser capaz de interagir e manobrar com o sistema em qualquer altura.

A distância de operação depende do alcance da ligação rádio para o drone. Além disso, as frequências de rádio podem estar sujeitas a interferências causadas por outros sistemas (carros telecomandados e aviões modelo, bem como rádio de banda de cidadãos), que utilizam as mesmas frequências, ou podem sofrer de interferências de sinal. Assim, dependendo da situação local da área de interesse, a frequência para a comunicação entre a estação de controlo e o drone tem de ser cuidadosamente selecionado (Ji & Luo, 2019).

Nas áreas costeiras, ou em terras altas, a ocorrência de ventos fortes impede, na maior parte dos casos a utilização da maioria dos drones.

A duração das baterias destes aparelhos é ainda reduzida, sendo que a duração média de uma bateria em drones elétricos é de 25 a 30 minutos, dependendo do seu estado. Isto faz com que numa área extensa de monitorização seja necessário recorrer a várias baterias.

1.3.3. Áreas de Aplicação

Com a franca expansão da comercialização de drones, o seu uso tornou-se cada vez mais generalizado e nos dias de hoje é utilizada em vastas áreas comerciais, industriais e científicas, sendo que os drones se tornaram mais acessíveis em termos de preços e facilidade de uso.

No que toca à geomática, os drones também têm visto a sua utilização crescer nas mais variadas áreas. São muita as áreas de aplicação onde geralmente são utilizadas imagens de drone e modelos tridimensionais, ou ortofotos recolhidos através de métodos fotogramétricos

Na agricultura, os produtores podem tomar decisões fiáveis para poupar dinheiro e tempo através da agricultura de precisão, obter um registo rápido e preciso dos danos e identificar potenciais problemas no campo (Nex & Remondino, 2014).

Na silvicultura, a utilização de drones permite avaliar o estado de parcelas florestais, vigiar os incêndios, monitorizar a vegetação, identificar espécies, calcular volumes, bem como a prática da silvicultura pode ser realizada com maior precisão (Berni, Zarco-Tejada, Suarez, & Fereres, 2009; Grenzdörffer *et al.*, 2008; Martínez-de Dios *et al.*, 2006; Restas, 2016).

No que diz respeito à arqueologia e à arquitetura, o levantamento e a modelação 3D de lugares e estruturas feitas pelo homem, podem ser realizados através de imagens de baixa altitude (<https://www.gim-international.com/content/article/improving-heritage-documentation>) (Chiabrando *et al.*, 2011; Lambers *et al.*, 2007; Oczipka *et al.*, 2009; Rinaudo *et al.*, 2012; Verhoeven, 2009).

Em termos ambientais, os voos regulares, rápidos e baratos, permitem a monitorização da superfície terrestre e dos corpos de água em múltiplas épocas (Niethammer *et al.*, 2010). Além disso, a cartografia cadastral (Manyoky *et al.*, 2012), as análises térmicas (Hartmann *et al.*, 2012), o cálculo do volume de escavação, a monitorização de vulcões (Smith *et al.*, 2009), a monitorização da linha de costa, ou o inventário de recursos naturais para análises geológicas também são viáveis em conjunto com a utilização dos drones.

Na gestão de emergência, os drones são capazes de adquirir rapidamente imagens para a avaliação precoce do impacto e o planeamento do salvamento (Chou *et al.*, 2010; Haarbrink & Koers, 2006; Molina *et al.*, 2012). O voo pode ser efetuado sobre áreas contaminadas sem qualquer perigo para os operadores ou quaisquer operações longas de pré-voo.

Os drones podem ser também utilizados na monitorização do tráfego, possibilitando a vigilância, a estimativa do tempo de viagem, as trajetórias, as ocupações das faixas e a resposta de incidência (Nex & Remondino, 2014).

1.3.4. Estado Atual e Tendências de Investigação sobre a Monitorização das Alterações da Linha de Costa com Recurso a Drones

A utilização de veículos aéreos não tripulados tem registado um aumento em múltiplas áreas. Como tal, a utilização de drones para a monitorização das alterações da linha de costa, tem vindo a revelar-se cada vez mais prática, eficaz e mais frequente, seja em trabalhos académicos ou em práticas empresariais e administrativas. Neste subcapítulo, foi elaborada uma análise bibliométrica de forma a analisar a evolução dos trabalhos científicos que se focam na utilização de drones na monitorização da erosão costeira.

Para seleção das publicações, foi utilizada a base de dados do *Web of Science* e a expressão para a pesquisa de publicações foi a seguinte:

(drone* OR "unmanned aerial vehicle*" OR "uav" OR "unmanned aircraft system*" OR "uas" OR "remotely piloted aircraft*" OR "rpa*" OR "structure from motion" OR "photogrammetry" OR "digital photogrammetry" OR "aerial photogrammetry") AND ("beach erosion" OR "coastline chang*" OR "shoreline chang*" OR "coast* erosion" OR "shoreline monitoring" OR "coast* survey*" OR "beach dune*" OR "shoreline erosion" OR "topograph* monitoring") NOT "satellite" NOT "satellite imagery".

Uma das limitações desta análise é a exclusão de publicações por não se incluírem nestes termos da pesquisa ou por não estarem na base de dados da *WoS*, pelo que é importante referir que os trabalhos incluídos nesta análise bibliométrica apenas correspondem a uma amostra de todas as publicações.

Esta pesquisa foi feita em Novembro de 2022 e analisa apenas os *Articles*, *Proceeding Papers* e os *Early Acess* entre 2002 e 2022, onde constam 160 publicações que irão servir de base bibliográfica.

A evolução da investigação nesta área é notória conforme se verifica na Figura I - 8. Registou-se um crescimento acentuado, principalmente a partir de 2017. Assim podemos entender o período 2002-2015 como o período de desenvolvimento desta temática, tendo sido publicados 30% dos artigos nesse intervalo e o período de 2015-2022 como o período de expansão, onde foram publicados 70% dos artigos.



Figura I - 8: Evolução do nº de publicações sobre a monitorização das alterações da linha de costa com recurso a drone.

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Web of Science*.

Em relação aos países com mais publicações (Figura I - 9), os Estados Unidos lideram com 25 publicações entre 2002 e 2022, seguidos da França com 17 publicações, Coreia do Sul com 14 publicações, terminando o “Top 5” com Espanha e Itália, com 13 e 10 publicações, respetivamente. Dos 25 países com mais publicações, 13 pertencem à Europa com 75 publicações, 2 pertencem à América do Norte com 31 publicações, e 5 pertencem à Ásia com 30 publicações.

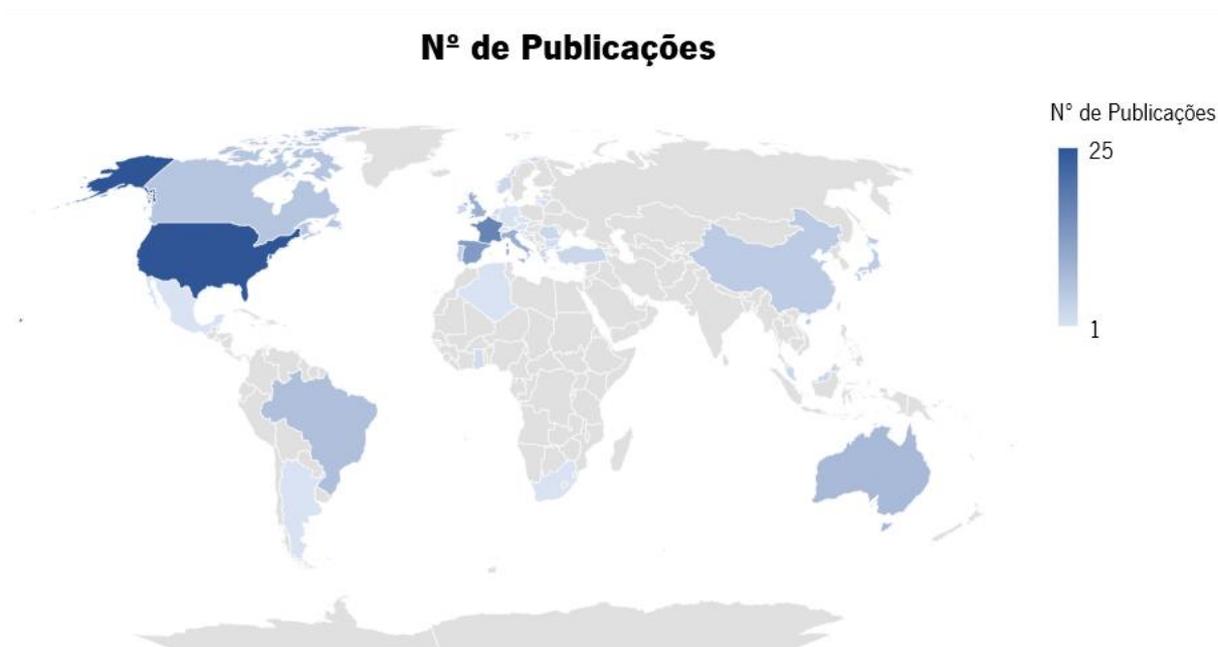


Figura I - 9: Distribuição espacial das publicações.

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Web of Science*.

As palavras-chave escolhidas pelos autores têm um impacto fundamental na forma como o artigo é representado e divulgado nas comunidades científicas. As palavras-chave identificam os principais temas da investigação e determinam o seu potencial para um artigo ter sucesso ou falhar (Day, 1998; Uddin *et al.*, 2015). A Tabela I - 3 demonstra quais as palavras-chave mais utilizadas pelos autores nas 160 publicações. Verifica-se que o termo “*coastal erosion*” é o mais utilizado nas publicações analisadas, o que indica que o objetivo de estudo na maior parte dos casos relaciona-se diretamente com os processos de erosão costeira. Se for feita uma análise em temporal, verifica-se que as palavras-chave “*lidar*” e “*structure from motion*” registaram um aumento gradual de utilização, o que representa o crescimento da implementação destas técnicas inovadoras dando nova utilidade aos drones, com resultados de maior precisão, no caso do LiDAR. O aumento da utilização da palavra-chave “*structure-from-motion*” está relacionado com o aumento da aplicação desta técnica fotogramétrica que permite criar modelos 3D através de sequências de sobreposição de fotografias 2D (Iglhaut *et al.*, 2019).

PALAVRAS-CHAVE	OCORRÊNCIAS
<i>coastal erosion</i>	35
<i>photogrammetry</i>	23
<i>uav</i>	21
<i>lidar</i>	14
<i>shoreline</i>	11
<i>erosion</i>	10
<i>monitoring</i>	10
<i>structure from motion</i>	10
<i>unmanned aerial vehicle</i>	10
<i>beach erosion</i>	9

Tabela I - 3: Palavras-chave mais utilizadas

A Figura I - 10 apresenta um mapa de visualização da rede de palavras-chave utilizando o *VOSviewer*, sendo que foram apenas consideradas as palavras-chave utilizadas pelo menos 5 vezes. Nesta rede, a espessura da linha representa a força de ligação (palavras-chave utilizadas mais vezes em conjunto) de cada palavra-chave com outras palavras-chave. Assim, verifica-se que as palavras-chave com a ligação mais forte são “*coastal erosion*” com “*structure from motion*” e “*coastal erosion*” com “*terrestrial laser*”

scanning”. O tamanho dos círculos na rede de palavras-chave representa a frequência com que cada palavra-chave foi utilizada. Na rede de palavras-chave também é perceptível a variação da utilização das palavras-chave ao longo dos anos, de acordo com a legenda no canto inferior direito, onde se verifica que os anos de maior produção bibliográfica nesta área científica correspondem à maior utilização de palavras-chave.

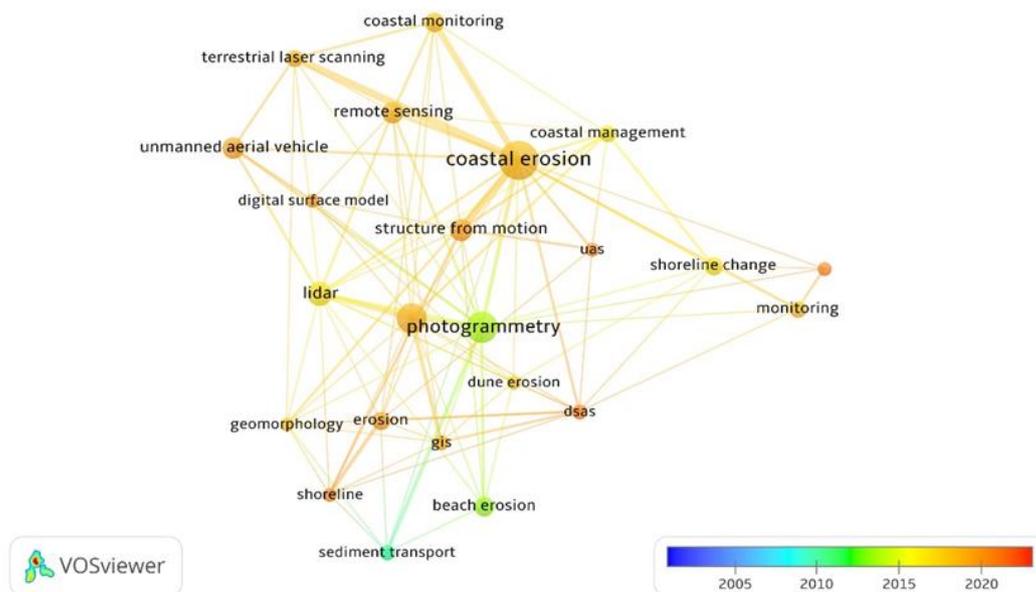


Figura I - 10: Rede de *keywords* mais utilizadas pelos autores.
 Fonte: Elaboração própria

Relativamente aos autores com maior influência nesta área, foram feitas duas análises expressas na Tabela I - 4. A primeira diz respeito aos autores com mais publicações e a segunda análise consiste na avaliação dos autores através do *m-index*. Este índice é baseado no *h-index*. Estes são índices de análise bibliométrica que servem para avaliar o impacto dos autores, tendo em conta as citações, o número de publicações e os anos desde a primeira publicação. O *h-index* quantifica o impacto e a produtividade de um autor através do número de artigos com citações maiores ou iguais a esse número (*i.e.*, um autor com 5 publicações com pelo menos 5 citações cada uma). Já o *m-index* é calculado através da divisão do *h-index* pelo número de anos desde a primeira publicação. Para estas duas análises foram considerados os países de filiação.

Relativamente ao número de publicações, os autores filiados em França são os que têm mais publicações, e 7 dos 10 autores com mais publicações estão filiados na Europa, o que demonstra mais uma vez o empenho do *velho continente* na monitorização da erosão costeira com recurso a drones.

Relativamente ao *m-index*, dos 10 autores com mais impacto, 7 estão filiados na Europa (5 em França e 2 em Portugal), e os restantes estão filiados na Austrália ou nos Estados Unidos.

Estes dados contribuem para a perceção dos países que mais investem na monitorização da erosão costeira, apesar destes índices não refletirem 100% da realidade. O *h-index* apresenta algumas desvantagens pois (1) não tem em consideração áreas de investigação diferentes, sendo injusto para investigadores com várias áreas de investigação, (2) tende a favorecer os investigadores com mais anos de carreira, (3) não tem em conta as auto-citações, podendo enviesar o impacto real de um investigador, (4) não tem em conta os trabalhos de coautoria e (5) não distingue as citações que são críticas, podendo um investigador ter um alto *h-index* mas ter uma reputação questionável (Bi, 2022)

AUTOR	Nº PUBLICAÇÕES	AUTOR	M - INDEX
Bruno Castelle (França)	5	Quentin Laporte-Fauret (EUA)	0.800
Laura Del Rio (Espanha)	5	Bruno Castelle (França)	0.667
David Rosebery (França)	5	David Rosebery (França)	0.667
Stéphane Bujan (França)	4	Allan Blake (Austrália)	0.667
Rafael Carvalho (Austrália)	4	Rafael Carvalho (Austrália)	0.600
Quentin Laporte-Fauret (EUA)	4	Gil Gonçalves (Portugal)	0.600
Ming K. Lim (Inglaterra)	4	Stéphane Bujan (França)	0.500
Javier Benavente (Espanha)	3	Vincent Marieu (França)	0.500
Gil Gonçalves (Portugal)	3	Umberto Andriolo (Portugal)	0.500
Yuichi S. Hayakawa (Japão)	3	Edward Anthony (França)	0.500

Tabela I - 4: Autores com mais publicações e com o melhor m-index

1.4. Fotografia Aérea

A fotografia aérea é, possivelmente, o melhor método de monitorização costeira contínua. É capaz de registar uma área específica com grande precisão no momento exato em que a foto foi tirada, o que torna a fotografia aérea um meio poderoso de análise da evolução geomorfológica e uma excelente ferramenta de monitorização (Henriques, 2006). A combinação da fotografia aérea com outras ferramentas, como o GPS ou *softwares* de processamento fotogramétrico, permite a criação de modelos 3D, modelos digitais de terreno e ortofotomapas (Baltsavias, 1999).

Os levantamentos de fotografia aérea destinados a estudos de avaliação da erosão costeira devem ser obtidos, sempre que possível, nas mesmas condições de maré, na mesma altura do ano, nas mesmas condições meteorológicas e nas mesmas condições de ondulação, entre outros.

A partir dos dados fotográficos, não é possível identificar, com certeza, os fatores que influenciam a variação e a intensidade dos indicadores de erosão costeira. No entanto, através da comparação de levantamentos aéreos em diferentes momentos temporais, é possível quantificar e calcular as taxas de erosão costeira (Henriques, 2006).

1.4.1. Fotogrametria e *Structure-from-Motion*

A fotogrametria pode ser considerada a ciência, a tecnologia ou até mesmo a arte que é utilizada para extrair, medir e interpretar informação fiável das propriedades qualitativas e quantitativas, de objetos ou superfícies através de fotografia, aplicada na produção cartográfica e na produção de MDT (Colomina & Molina, 2014; Grottoli *et al.*, 2021). Os resultados dos processamentos fotogramétricos, ao serem inseridos num ambiente SIG constituem uma ferramenta muito relevante para a monitorização costeira. A etimologia do termo “fotogrametria” deriva das palavras gregas “*photon*”, “*grafos*” e “*metron*”, que significam luz, escrita e medições, respetivamente (Brito & Coelho, 2002).

O principal objetivo da fotogrametria é remover as distorções causadas pelo sistema de obtenção de dados (câmara fotográfica), pelo movimento do drone ou aeronave, pela perspetiva e principalmente de deformação tangencial, equiparando, de modo mais preciso possível, as coordenadas dos píxeis medidos pelo sensor da câmara fotográfica, com as coordenadas geográficas (x, y e z) do terreno (Brito & Coelho, 2002; Linder, 2003; Schenk, 2005; Schmidt & Kühn, 2007). Para a correção destas distorções, é utilizado o processo de ortoretificação, o qual é constituído por duas componentes: as especificações do equipamento fotográfico e os pontos de controlo do terreno (em inglês, *Ground Control Points* – GCP) (Egels & Kasser, 2001; Schenk, 2005; Schmidt & Kühn, 2007).

Até 2014, as técnicas de fotogrametria não eram capazes de gerar nuvens de pontos 3D densas e, como consequência, muitos cientistas passaram a utilizar ferramentas *laser*. Porém, o desenvolvimento das tecnologias e algoritmos, nomeadamente o *Structure-from-Motion*, estão a tornar a fotogrametria uma tecnologia novamente competitiva e automatizada (Nex & Remondino, 2014).

Structure-from-Motion (SfM) é uma técnica rápida, automática e de baixo custo que permite a obtenção de dados 3D com elevada resolução (Micheletti *et al.*, 2015; Westoby *et al.*, 2012).

Os princípios da SfM são praticamente os mesmos utilizados na fotogrametria estereoscópica, contudo, ao invés da utilização do par de fotografias, a técnica SfM utiliza múltiplas fotografias e as respetivas sobreposições como dados de entrada (Tomás *et al.*, 2020; Westoby *et al.*, 2012). O processo desta técnica envolve duas etapas (Figura I - 11). A primeira etapa é a estimativa do movimento da câmara, através da identificação e correspondência de pontos em comum em diferentes imagens. Na segunda etapa, dá-se a reconstrução 3D, na qual a estrutura da cena 3D é reconstruída a partir da triangulação das correspondências em 2D da etapa anterior. Isto implica estimar as posições 3D dos pontos na cena, e depois utilizá-los para estimar a forma e a posição dos objetos na cena. Esta etapa pode ser feita utilizando vários algoritmos, tais como reconstrução estéreo ou a multi-visão estérea (Jiang *et al.*, 2020). O resultado de SfM pode ser uma nuvem de pontos 3D, uma rede de triângulos ou um modelo 3D texturizado da cena. A técnica SfM tem muitas aplicações em campos como a computação gráfica, robótica, realidade aumentada e arqueologia (Brunier *et al.*, 2016; Fonstad *et al.*, 2013; Sharr, 2019).

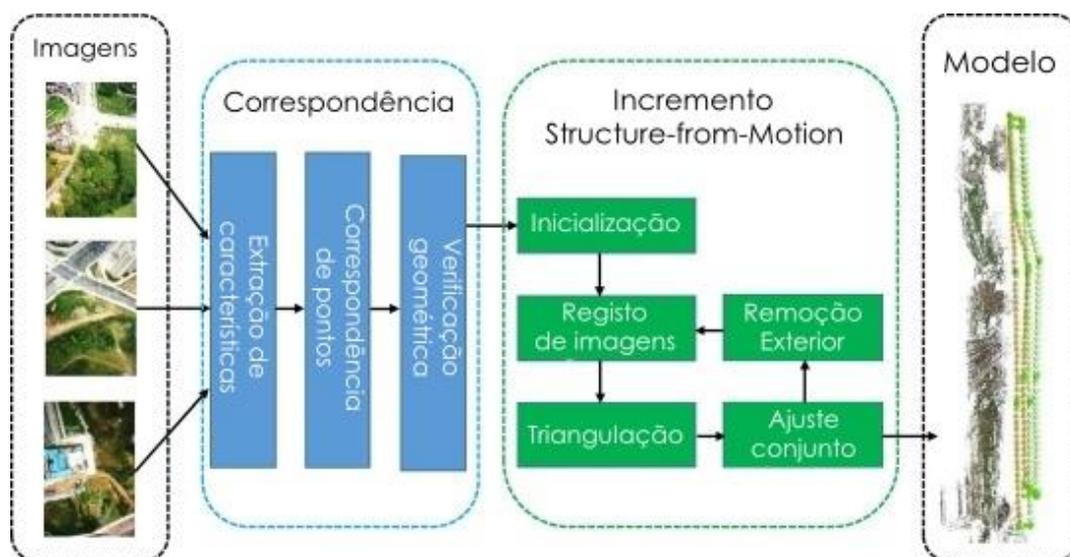


Figura I - 11: *Workflow* do processamento fotogramétrico.
Fonte: Elaboração própria

1.4.2. Estereoscopia e Sobreposição

A estereoscopia é uma técnica de criação ou exibição de imagens em 3D que utiliza o princípio da visão binocular, ou seja, o mesmo princípio utilizado pelo olho humano. A visão binocular representa a capacidade que a visão humana tem para ver objetos a partir de ângulos ligeiramente diferentes.

Na fotogrametria com recurso a drones, a captura de imagens aéreas de um determinado terreno ou objeto permite criar modelos 3D precisos e detalhados. Ao sobrevoar uma área, um drone equipado com uma câmara captura várias imagens de um determinado ponto terrestre a partir de diferentes ângulos e altitudes. A estereoscopia é importante no processamento fotogramétrico porque permite que o software de fotogrametria reconstrua a geometria do terreno ou objeto a partir das diferenças de perspectiva entre as várias imagens capturadas (Gangapurwala, 2021; Thevara & Vasanth Kumar, 2018) (Figura I - 12)

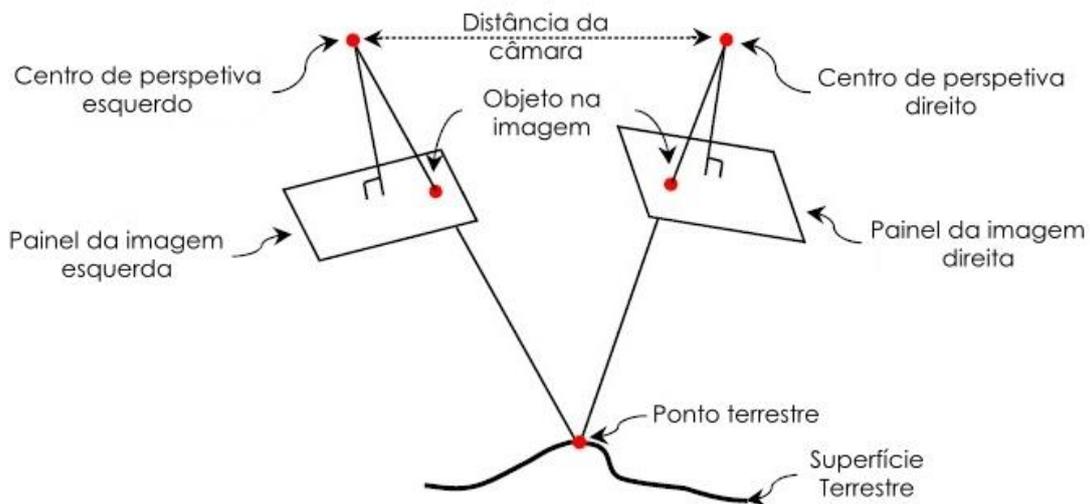


Figura I - 12: Representação da técnica de estereoscopia.
Fonte: Adaptado de Thevara & Vasanth Kumar (2018)

Quanto maior for a quantidade de imagens estereoscópicas a partir de diferentes ângulos, maior será a precisão e a qualidade do modelo tridimensional da superfície terrestre. Na fotogrametria, a quantidade de imagens é representada pela taxa de sobreposição das imagens.

A sobreposição das imagens aéreas ocorre de forma longitudinal e lateral. A sobreposição longitudinal representa a área em comum (em %) em duas ou mais imagens adjacentes no sentido da linha de voo, enquanto que a sobreposição lateral corresponde à área em comum nas imagens obtidas em linhas de voo paralelas (*DroneEng*, 2019) (Figura I - 13). Quanto maior a taxa ou percentagem de sobreposição, maior a quantidade de pontos de semelhança (que posteriormente serão pontos de correspondência

entre múltiplas imagens) e, conseqüentemente irá resultar em modelos 3D mais fidedignos. Porém, quanto maior a sobreposição (e maior quantidade de imagens), maior será o tempo de processamento. Na aplicação à fotogrametria digital aérea, são adotadas sobreposições frontais de 80% e laterais de 60% a 80% para compensar a instabilidade da aeronave (Colomina & Molina, 2014; Haala *et al.*, 2012a). Na técnica *Structure-from-Motion* existe a necessidade de uma elevada sobreposição para cobrir toda a geometria do objeto ou superfície a partir de múltiplos pontos de vista, o que originou a expressão: “estrutura derivada de um sensor em movimento” (*Structure-from-Motion*). Neste caso, a sobreposição deverá ser de 90% (Micheletti *et al.*, 2015; Viana, 2021).

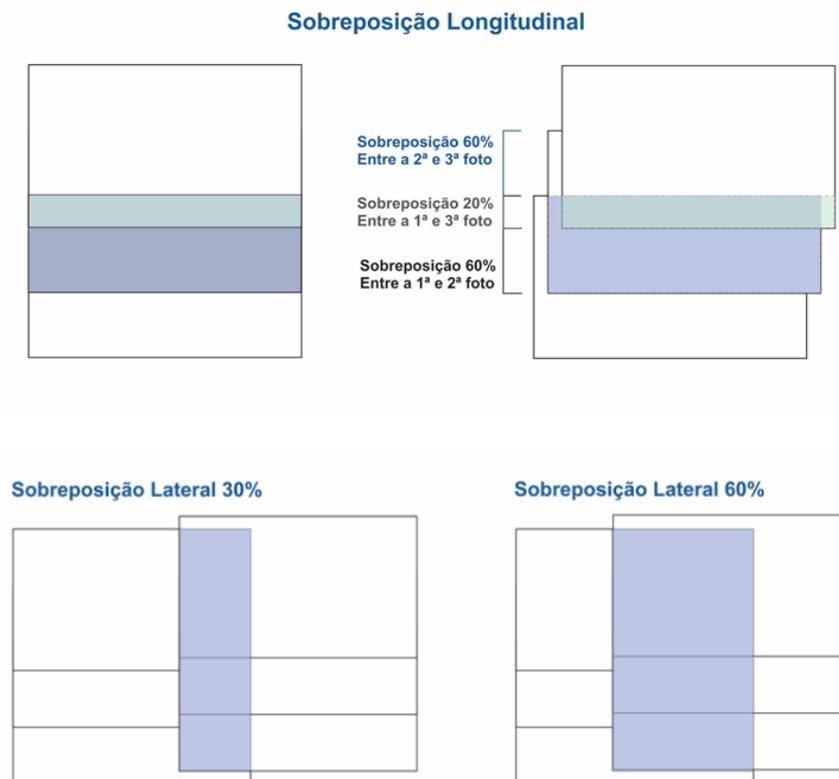


Figura I - 13: Representação gráfica da sobreposição lateral e longitudinal.
 Fonte: <https://blog.droneng.com.br/buracos-no-ortofotomosaico-como-evitar/>

1.4.3. *Ground Control Points*: Ortoretificação e Georreferenciação

A fotografia aérea vertical, apresenta várias deformações geométricas, consequência do facto de se obter uma projecção planar a partir de uma superfície tridimensional centrada num ponto, normalmente o centro da fotografia. Por isso, os pontos mais afastados do centro apresentam maior deformação tangencial. Existem outros fatores que originam essa deformação, tais como a altitude, o movimento e a velocidade do drone e a lente da câmara. (Henriques, 2006; Linder, 2003; Schenk, 2005; Schmidt &

Kühn, 2007). De forma a corrigir a deformação tangencial, são utilizados os Pontos de Controlo Terrestres (*Ground Control Points*) (Hapke & Richmond, 2000). Estes são pontos conhecidos na superfície terrestre com coordenadas conhecidas que são utilizadas como pontos de referência para melhorar também a precisão dos dados cartográficos aéreos obtidos a partir de drones ou outras plataformas de deteção remota. A utilização de GCPs pode aumentar significativamente a precisão de um projeto de mapeamento com drones, especialmente quando são necessários dados de alta precisão como a monitorização da erosão costeira.

Na colocação dos GCPs deve considerar os seguintes aspetos (<https://www.propelleraero.com/blog/how-to-optimize-your-ground-control-point-placement-for-drone-surveying/>):

- Determinar o número necessário de GCPs. Para um projeto, este número depende do tamanho e complexidade da área a ser mapeada, bem como do nível de precisão desejado.
- Selecionar a localização dos Pontos de Controlo, devendo ser localizados em áreas abertas onde possam ser facilmente identificados a partir de imagens aéreas. Devem também ser distribuídos uniformemente por toda a área a ser cartografada para assegurar uma cobertura precisa.
- Medir os GCPs com precisão, utilizando um GPS, por exemplo. A precisão das medições deve estar dentro do nível de precisão desejado para o projeto.
- Registrar as coordenadas dos Pontos de Controlo com precisão e fiabilidade, e referenciadas a um sistema de coordenadas conhecido.
- Incluir os GCPs no projeto de mapeamento do drone através da marcação física no solo ou através da criação de marcadores virtuais no software de mapeamento.

A deformação tangencial poderá ser também anulada com recurso à ortorretificação. A ortorretificação consiste na correção da fotografia para que se torne numa projeção ortogonal, tornando assim possível a sua utilização como mapa planimétrico (Nielsen, 2004). É um processo matemático que recorre a parâmetros internos de orientação, tais como especificações do sensor, e externos, como a posição da câmara aquando da obtenção das fotografias (Linder, 2003; Schmidt & Kühn, 2007).

A ortorretificação digital é um processo que implica a translação de cada pixel da imagem para a posição geometricamente correta relativamente a um referencial de coordenadas. Com uma base ortorretificada de referência com pontos comuns à fotografia a ortorretificar ou um conjunto de pontos de controlo no solo (GCP) de coordenadas conhecidas, cuja identificação seja possível efetuar na fotografia, conseguem-se produzir ortofotomapas de elevada precisão (Henriques, 2006). Este processo não só permite a

ortorretificação da fotografia aérea, mas também a sua georreferenciação (Hapke & Richmond, 2000; Henriques, 2006; Schmidt & Kühn, 2007).

1.4.4. Ortofotomapas, Modelos Digitais de Terreno e de Superfície

Um ortofotomapa (ou ortomosaico), resulta de um mosaico constituído por várias fotografias ortorretificadas (ortofotografias). Estando georreferenciado e contendo uma escala, um ortofotomapa pode ser integrado num Sistema de Informação Geográfica, de forma a medir distâncias e áreas, determinar posições geográficas e quantificar as mudanças geomorfológicas, a nível bidimensional e tridimensional, que sejam identificáveis fotograficamente através da sobreposição de informação proveniente de outros ortofotomapas (Schmidt & Kühn, 2007). Por isso, os ortofotomapas são uma excelente ferramenta de monitorização de zonas costeiras.

Os Modelos Digitais de Terreno (MDT) são considerados como importantes conjuntos de dados geoespaciais devido às possibilidades versáteis de os utilizar. Os MDT fornecem a base para modelação e análise da informação espacial – topográfica e é essencial para a previsão e análise da topografia do terreno. A aplicação do MDT desempenha um papel vital em várias disciplinas tais como fotogrametria, deteção remota, planeamento urbano, topografia, geomorfologia, engenharia civil, gestão de recursos, engenharia geológica, gestão ambiental, geografia, planeamento de rotas, cartografia, jogos de computador, simulação de voo, entre outros (Lakshmi & Yarrakula, 2019). Estes modelos correspondem a um conjunto de dados em suporte numérico que permite associar a qualquer ponto num plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude (Matos, 2007). Segundo San e Suzen (2005), uma maior precisão dos MDT pode ser alcançada através do aumento do número de GCPs na área de estudo. Os mesmos autores afirmam ainda que existem vários fatores que influenciam a qualidade do MDT, como métodos de aquisição de dados, natureza dos dados de entrada, resolução vertical e técnicas utilizadas para desenvolver o MDT. Por isso, a exatidão vertical dos Modelos Digitais do Terreno variam em função da cobertura do solo, da quantidade de GCPs e do declive do terreno (Hodgson & Bresnahan, 2004; Li *et al.*, 2005; San & Suzen, 2005; Su & Bork, 2006).

Um MDT é considerado um modelo topográfico altimétrico, gerado digitalmente, sendo que nestes modelos apenas está representado o relevo do terreno, não sendo considerados os valores da altimetria relativa à vegetação, edifícios, nem objetos artificiais (Nielsen, 2004). Por outro lado, os Modelos Digitais de Superfície (Figura I - 14) representam toda a superfície, incluindo, portanto, os valores altimétricos de elementos como edifícios e vegetação (Rau *et al.*, 2002)

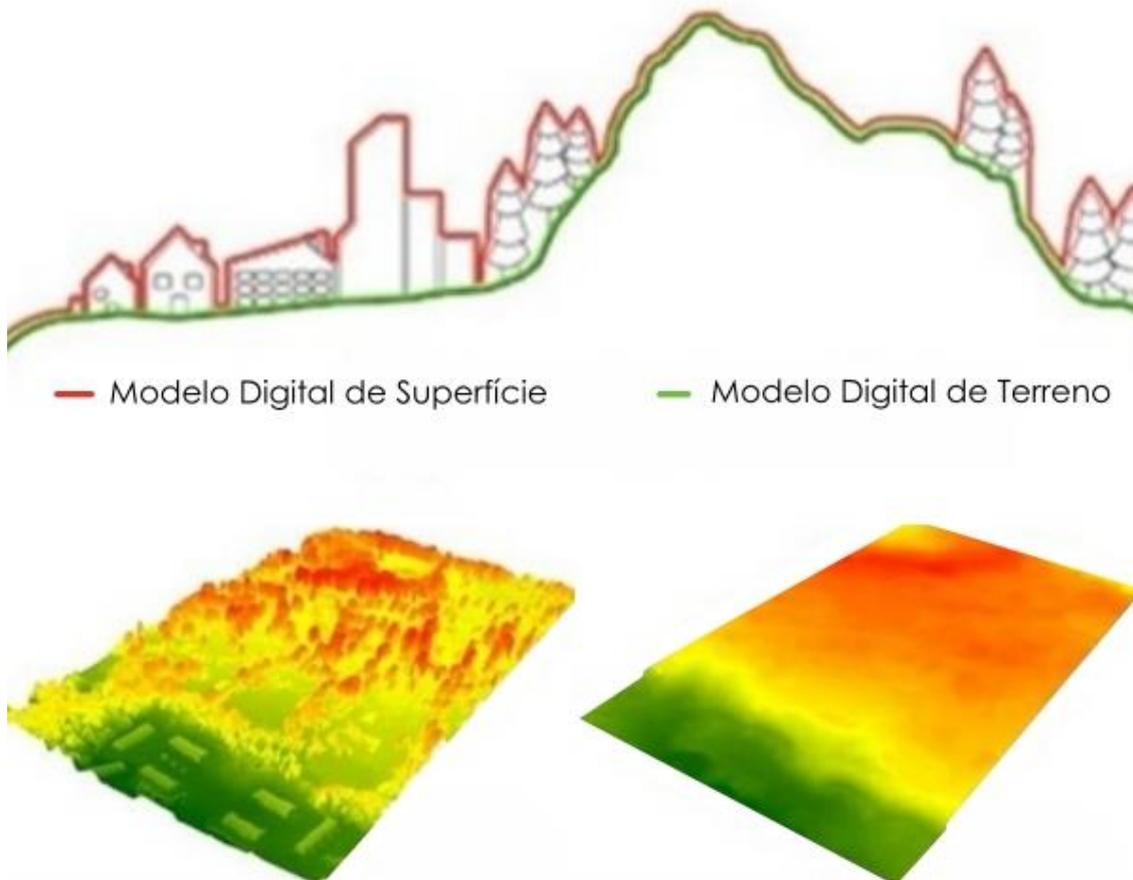


Figura I - 14: Esquema comparativo entre MDS (linha vermelha) e MDT (linha verde).

Fonte: Adaptado de <https://www.dronevisual.com/post/o-que-%C3%A9-um-modelo-de-superf%C3%ADcie-e-de-terreno>

Estes modelos digitais são preciosos na monitorização da erosão costeira, pois sendo constituídos por informação tridimensional precisa do terreno permitem (1) calcular volumes em praias/dunas e registar e comparar esses dados ao longo dos anos (J. A. Gonçalves & Henriques, 2015; Henriques, 2006; Madeira *et al.*, 2013), (2) quantificar possíveis fenómenos de migrações ou galgamentos (J. A. Gonçalves & Henriques, 2015; Henriques, 2006; Madeira *et al.*, 2013; Mitsova, 2004), (3) analisar mudanças geomorfológicas de zonas costeiras (Hapke & Richmond, 2000; Madeira *et al.*, 2013), (4) representar a hipsometria litoral (Matos, 2007) e (5) obter perfis topográficos (Matos, 2007).

1.5. Sistemas de Informação Geográfica

Desenvolvidos na década de 1960, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido definidos de várias maneiras ao longo dos anos. Um Sistema de Informação Geográfica permite-nos visualizar, questionar, analisar e interpretar dados para compreender relações, padrões e tendências. Com raízes na ciência da geografia, os SIG incorporam diversos tipos de dados. Analisa a localização espacial e organiza camadas de informação em visualizações através de mapas e cenas 3D. Através desta capacidade exclusiva, os SIG revelam conhecimentos profundos sobre dados, tais como padrões, relações e situações, ao ajudar os utilizadores a tomar decisões inteligentes (<https://www.esri-portugal.pt/pt-pt/o-que-sao-os-sig/overview>).

1.5.1. Conceito e Evolução dos SIG

De acordo com Denègre & Salgé (1996), Mendes (1994) e Puebla & Gould (1994), um Sistema de Informação Geográfica é considerado um caso particular e especial dos sistemas de informação em geral, que utilizam por base a definição de sistema de informação – sistema de comunicação que permite comunicar e tratar informação. Assim, um SIG é um sistema que permite comunicar e tratar informação geográfica. Orientado para informar o utilizador acerca do território, um SIG recorre a um parâmetro essencial: a localização.

Um SIG tem por objetivo final o apoio à decisão, suportada por conhecimentos geográficos e de meios de tratamento, de representação e de comunicação das mesmas (Denègre & Salgé, 1996).

No final da década de 1960, a informatização da produção cartográfica deu origem a uma nova tecnologia chamada geomática, que tem como objetivo principal a automatização da cartografia.

Com o passar do tempo e a necessidade de processamento mais eficiente e completo, os dados cartográficos foram organizados em bases de dados definidas como uma estrutura de dados que permitem armazenar e fornecer dados a múltiplos usuários independentes ((AFNOR), 1989). A combinação de diversas bases de dados deu origem ao conceito de sistema informático capaz de gerir a sua síntese, gestão, alimentação, arquivo, atualização e muito mais.

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) possui duas particularidades notáveis: (1) capacidade de gerir e tratar as relações espaciais entre objetos ou fenómenos no espaço terrestre, o que requer funções de análise espacial e síntese para o apoio à decisão; e (2) a representação do espaço e das suas componentes sob a forma de uma carta ou planta, exigindo funções de construção e produção cartográfica.

Apenas na década de 80, os Sistemas de Informação Geográfica se tornaram o objetivo geral da geotecnologias, abrangendo todos os elementos, relações e funções ligadas à exploração de conhecimentos sobre o espaço terrestre.

Num estudo para o Conselho Nacional de Informação Geográfica (CNIG) de França, Didier (1990) definiu um SIG como um conjunto de dados referenciados no espaço, estruturado, de forma a se poder extrair comodamente sínteses úteis à decisão.

Bolstad (2007) definiu um SIG como um sistema computacional que apoia a obtenção, manutenção, armazenamento, análise, visualização e distribuição de dados e informações espaciais.

Todas estas definições destacam duas facetas importantes dos SIG: as funções técnicas e o apoio ao utilizador. Assim, um SIG deve ser capaz de atender às necessidades dos profissionais de cartografia que desejam automatizar a produção de seus produtos, além de atender às necessidades de tamanho e diversidade quase ilimitadas dos usuários finais de SIG que buscam tomar decisões informadas.

Para Denègre & Salgé (1996), um SIG deve responder a cinco questões – “Onde?”, “O quê?”, “Como?”, “Quando?” e “Se?”.

1.5.2. Estrutura dos SIG

Um Sistema de Informação Geográfica é a combinação de pessoas qualificadas, dados espaciais e descritivos, métodos analíticos, programa e hardware – todos organizados para automatizar, gerir e fornecer informação através de apresentações geográficas (Zeiler, 1999). Desta descrição, identificam-se cinco componentes fundamentais que compõem um SIG: a parte física do sistema (*hardware*), o programa (*software*), os métodos analíticos, os dados e a componente humana (Figura I - 15).

A parte física (*hardware*) pretende dar resposta às diversas facetas de um SIG. É necessária uma plataforma (como um computador pessoal ou uma rede de estações de trabalho) onde é instalado o *software*, armazenada toda a informação e projetos desenvolvidos, e disponibilizados os resultados ou dados para acesso externo.

O *software* é a componente que permite operar e manipular os dados. Com a maior divulgação e utilização dos SIG, surgiram no mercado vários produtos que, no geral, oferecem funcionalidades semelhantes, distinguindo-se pela forma como armazenam os dados espaciais, pela facilidade de utilização e pelo apoio pós-venda prestado.

Os técnicos que operam com SIG recorrem a procedimentos que são indispensáveis ao bom funcionamento destes sistemas. A ciência aplicada num contexto espacial, tal como a meteorologia, a hidrologia ou a epidemiologia, utilizam procedimentos de forma a garantir a qualidade dos dados

(atualizados, consistentes e corretos), utilizam também algoritmos que resolvem problemas espaciais em redes lineares ou em topologias de polígonos.

Os dados são uma representação abstrata e em geral simplificada do mundo real, e são, geralmente, a componente crítica de um SIG, sendo que todas as operações são executadas sobre eles e a utilidade dos resultados depende da qualidade desses dados.

Por fim, as pessoas (*liveware*) englobam todos aqueles que planejam, desenvolvem, implementam, ou são meros utilizadores finais (que podem estar a utilizar um SIG sem o saber, *i.e. Google Maps*). A maior parte das definições de SIG centravam-se apenas nas componentes de *hardware*, *software*, dados e análises. Contudo, um SIG não pode existir fora de um contexto organizacional, onde pessoas planeiam, implementam e operam o sistema, mas também tomarão decisões apoiando-se nos resultados dos SIG.



Figura I - 15: Estrutura dos dados dos SIG.

Fonte: <https://www.geoaplicada.com/sig-e-suas-aplicacoes/>

1.5.3. Potencialidades e Aplicações dos SIG

Um Sistema de Informação Geográfica é, como se consegue perceber pelas suas definições, uma ferramenta extremamente poderosa que apresenta inúmeras potencialidades, das quais se destacam (Burrough *et al.*, 2015; Chang, 2018; DeMers, 2008; Longley *et al.*, 2015):

- Análise espacial: Os SIG permitem que os dados georreferenciados sejam analisados espacialmente, possibilitando a identificação de padrões e tendências, tomada de decisões e previsão de resultados.

- Visualização: Os SIG permitem a representação de dados espaciais em mapas, tornando mais fácil a visualização e compreensão de padrões espaciais e relações entre diferentes elementos.
- Integração de dados: Os SIG permitem a integração de diferentes tipos de dados, incluindo dados espaciais, de modo a fornecer uma visão mais completa e holística de um determinado problema.
- Partilha de informações: Os SIG permitem que as informações geográficas sejam partilhadas e acessíveis a várias partes interessadas, aumentando a colaboração e a tomada de decisões de forma mais informada.
- Monitorização e gestão: Os SIG permitem monitorizar e gerir áreas geográficas específicas de forma mais eficiente, permitindo a gestão de recursos naturais, planeamento urbano, gestão de desastres naturais e muitas outras aplicações.
- Automatização de processos: Os SIG permitem a automatização de processos, como por exemplo, o cálculo de rotas e a atribuição de tarefas, poupando tempo e esforço na realização de tarefas que antes seriam realizadas manualmente.

Tendo em conta estas potencialidades, facilmente se compreende que os Sistemas de Informação Geográfica apresentam um vasto domínio de aplicação e que o seu uso se torna fundamental em diversas áreas, conforme apresentado na Conferência do Utilizador ESRI, por Zeiler (1999):

- Agricultura: imagens de satélite mostrando o uso do solo combinadas com modelos de oscilação do estado do tempo para o *El Niño* para prever efeitos na agricultura;
- Defesa: a força aérea dos Estados Unidos utiliza a tecnologia SIG para gerir, manter e visualizar milhões de registos climáticos;
- Distribuição de água e recursos hídricos: um ministério no Egito está a construir um sistema para gerir o canal do rio Nilo, os restantes canais, os esgotos e as bombas;
- Ecologia e conservação: no Quênia, um SIG revelou que mamíferos de grande porte da savana dispersam-se na estação húmida e concentram-se numa bacia durante a estação seca;
- Eletricidade e gás: a cidade de Beirute está a analisar a sua rede de energia de forma a minimizar as perdas e aumentar os níveis de voltagem;
- Exploração mineira e geociências: uma empresa do ramo utiliza um SIG para criar bases de dados tridimensionais para a monitorização de desperdícios;
- Gestão de emergências: em 1997, a nave espacial *Cassini* foi lançada com a missão de explorar Saturno. Um SIG foi utilizado para avaliar o risco que representaria um acidente envolvendo o plutónio dos geradores que estavam a bordo;

- Gestão do ambiente: uma grande barragem está em construção na Turquia. O SIG é utilizado numa avaliação completa dos efeitos que provocará na irrigação, produção de energia hidroelétrica, saúde, exploração mineira, educação, turismo e telecomunicações;
- Oceanografia, zonas costeiras e recursos marinhos: o *U.S. Naval Oceanographic Office* utiliza dados sobre a temperatura dos mares obtidos de forma remota para estudar frentes e correntes oceânicas;
- Saúde pública: utilização dos SIG para analisar a epidemiologia de doenças raras e estimar a exposição de indivíduos aos fatores ambientais de risco;
- Telecomunicações: na Indonésia, um SIG é empregue para gerir a radiodifusão ao estudar a localização de estações, a demografia das áreas servidas e a manutenção do equipamento;
- Transportes: na Coreia do Sul, um SIG monitoriza o tráfego em tempo real de forma a mitigar engarrafamentos nas vias rápidas.

1.5.4. Sistemas de Informação Geográfica e Erosão Costeira na agenda científica

A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica é vista como uma técnica fulcral na gestão das zonas costeiras, permitindo quantificar, identificar, e avaliar e compreender os principais processos, numa determinada zona costeira. Anteriormente, já se referira a importância da monitorização costeira com ferramentas de baixo custo, e, nesse aspeto, os SIG apresentam baixos custos associados, tornando possível a rentabilização de recursos financeiros da gestão costeira.

Os SIG, com uma ampla gama de ferramentas disponíveis, permitem a manipulação de informações georreferenciadas multidisciplinares relacionadas com as zonas costeiras, incluindo planeamento costeiro e obras de defesa costeira, avaliação do risco de inundação costeira, dinâmica sedimentar e evolução da linha de costa, entre outras características que definem essas áreas, reunindo as condições necessárias para a realização de análises espaciais e previsão de cenários, indispensáveis ao planeamento do território

A Figura I - 16 demonstra a evolução da pesquisa nesta temática ao longo dos anos, através de uma pesquisa na base de dados da *Web of Science*, com base em 540 artigos publicados entre 1994 e 2022. Verifica-se que estas pesquisas surgiram no mesmo período de expansão dos Sistemas de Informação Geográfica e que, na última década, se registou um forte aumento de artigos científicos que abordam a temática da erosão costeira em conjunto com os SIG.

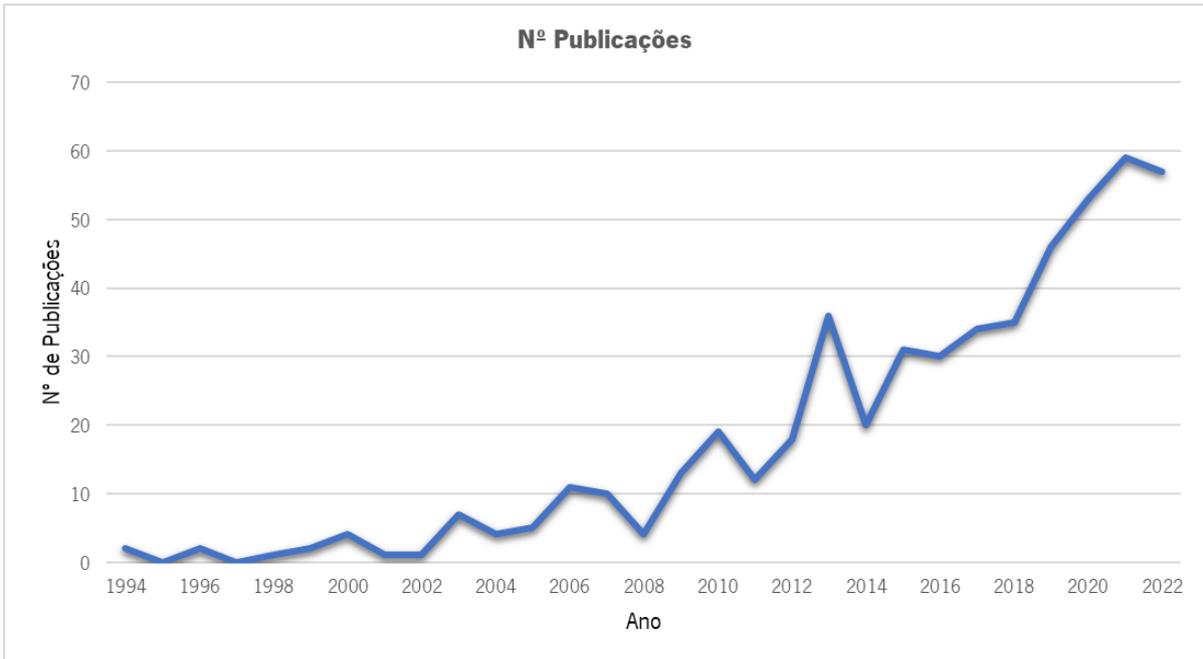


Figura I - 16: Evolução do nº de publicações sobre os SIG e erosão costeira.
Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Web of Science*.

CAPÍTULO II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Enquadramento Geográfico

O território escolhido para a aplicação desta metodologia de investigação é o Parque Natural do Litoral Norte, localizado no município de Esposende, distrito de Braga, na NUTS III do Cávado, na NUTS II do Norte, no Noroeste de Portugal.

Composto por 15 freguesias e 35 132 habitantes, segundo os Censos 2021, o município de Esposende integra toda a área terrestre do Parque Natural do Litoral Norte. Contudo, a parte terrestre representa apenas 15% (1 316,87 ha) de todo o PNLN, sendo a maior parte do Parque composta de área marinha (7 445,34 ha).

O Parque Natural do Litoral Norte estende-se ao longo de 16km de costa, desde o Estuário do Rio Neiva, a norte, até à Praia da Ramalha.

No contexto de erosão costeira, o PNLN tem sofrido com as consequências deste problema, ainda que existam locais do Parque que são mais sensíveis às variações da linha de costa, dos quais se destacam sobretudo: a Restinga e a Praia de Ofir, com as emblemáticas Torres de Ofir; a Praia da Bonança; a localidade de São Bartolomeu do Mar, onde algumas habitações tiveram mesmo que ser demolidas em 2014; e as Praias das Pedrinhas e de Cedovém, ocupadas por bairros de pescadores e alguns restaurantes, que todos os invernos veem as suas habitações, ilegais na sua maioria, ameaçadas pela força das ondas.

Para este trabalho e tendo por base os locais mais vulneráveis aos processos de erosão costeira, foi selecionado um troço costeiro compreendido entre a extremidade norte da Restinga de Ofir e o limite sul da Praia da Bonança, com cerca de 3km de extensão. A escolha deste troço foi influenciada por quatro motivos: (1) é o local com maior dinâmica costeira em todo o Parque Natural do Litoral Norte devido ao desembocadura do Rio Cávado; (2) é o local do PNLN com a maior pressão urbana; (3) é o local mais frequentado por turistas ao longo do ano; e (4) é das zonas do Parque que mais foram alvo de fortes investimentos na aplicação de medidas de combate à erosão costeira, entre elas, a alimentação artificial de praias, aplicação de geocilindros e reconstrução e manutenção de paredões e esporões.



Figura II - 1: Mapa do enquadramento geográfico do Parque Natural do Litoral Norte
 Fonte: Elaboração própria

2.2. Geologia

A área de estudo deste trabalho é englobada na folha 5-C (Barcelos) da Carta Geológica de Portugal, à escala de 1:50 000.

Segundo a notícia explicativa desta folha, o troço costeiro em análise é constituído por unidades geológicas do (1) Moderno (aluviões atuais; areias e cascalheiras de praia ou de rio; e areias de duna), (2) Plio-Plistocénico (depósitos de terraços fluviais; e depósitos de praias antigas) e (3) Paleozóico (Silúrico - Valenciano e Salopiano inferior – Xistos e grauvaques, com intercalações de xistos ampelitosos com graptólitos, em geral, fortemente metamorfizados; e Ordovícico - Caradociano e Skidaviano – Xistos grauvacóides e grauvaques, quartzitos intercalados e quartzitos com *Cruziana* e *Scolithus*) (C. Teixeira *et al.*, 1969).

A área de estudo é composta por areias de dunas, areias e cascalheiras de praia ou de rio do Quaternário, mais precisamente do Holocénico (C. Teixeira *et al.*, 1969). As dunas formam uma faixa quase contínua ao longo de toda a orla costeira, sendo particularmente desenvolvidas na área de Apúlia e Fão. As areias das praias e dunas são quase sempre finas e em Fão observam-se areias negras, ilmeníticas. Ao longo dos rios, sobretudo do Cávado, acumulam-se aluviões recentes, às vezes muito desenvolvidas. São, essencialmente, areias e lodos fluviais e depósitos argilosos de fundo de vale. Nas areias estão presentes predominantemente minerais de quartzo, mas também podem estar presentes minerais de feldspato, granada, micas, turmalina, magnetite, hornblenda e piroxena (C. Teixeira *et al.*, 1969). Para Este, na periferia encontram-se formações referentes ao PlioPlistocénico, entre elas depósitos de terraços fluviais e praias antigas. Nestas formações (PlioPlistocénico) aflora o Complexo Xisto-Grauváquico. Estes terrenos silúricos formam diferentes afloramentos, rodeados quase sempre por granito, que os metamorfozou fortemente. No Paleozóico Superior novos movimentos orogénicos atingiram os terrenos formados, originando estruturas assaz complexas, como as que se observam na região da Apúlia e Esposende (Cavalos de Fão). Durante o Quaternário os rios instalaram o seu curso e o mar espraiou-se pelas praias antigas. Os depósitos fluviais existentes entre Barcelos e a Apúlia mostram que o rio Cávado teve o estuário localizado nessa direção, durante parte do Quaternário. Talvez devido a um fenómeno de captura, orientada por condições tectónicas, como a existência de falha, o rio passou a correr no leito atual, encaixando entre relevos (C. Teixeira *et al.*, 1969).

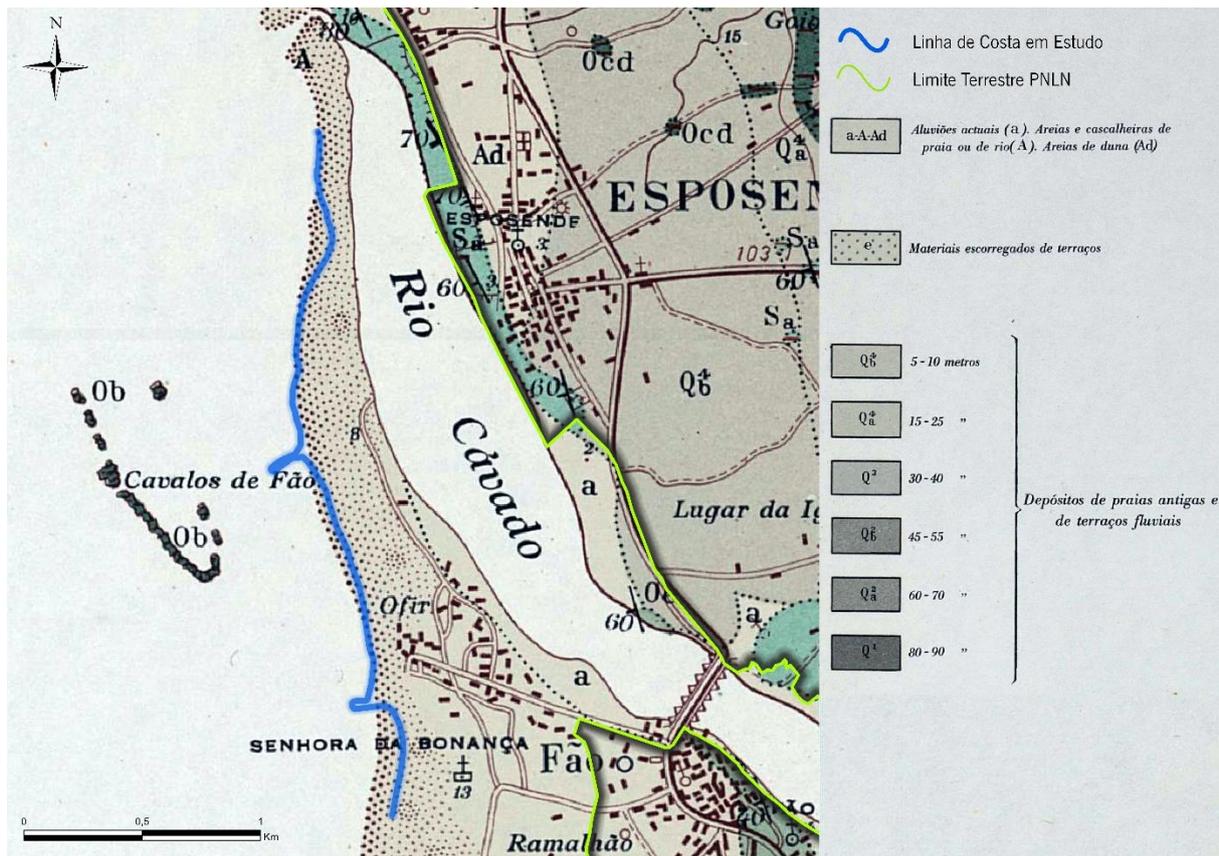


Figura II - 2: Enquadramento geológico da área de estudo, com ampliação da folha 5-C da Carta Geológica de Portugal

Fonte: Adaptado de C. Teixeira *et al.* (1969)

2.3. Geomorfologia

O Parque Natural do Litoral Norte apresenta uma morfologia relativamente plana, não ultrapassando os 17 metros de altitude, com os valores altimétricos mais baixos próximos ao mar (Figura II - 3).

Ao longo da costa do PNLN é possível identificar diversas formas de relevo (geoformas), como: praias, que podem ser arenosas ou com seixos; dunas, que poderão ser mais antigas/dunas medievais e mais recentes; e arribas, que poderão ser classificadas como morta ou atual, distribuídas por duas plataformas marinhas (Loureiro, 2006).

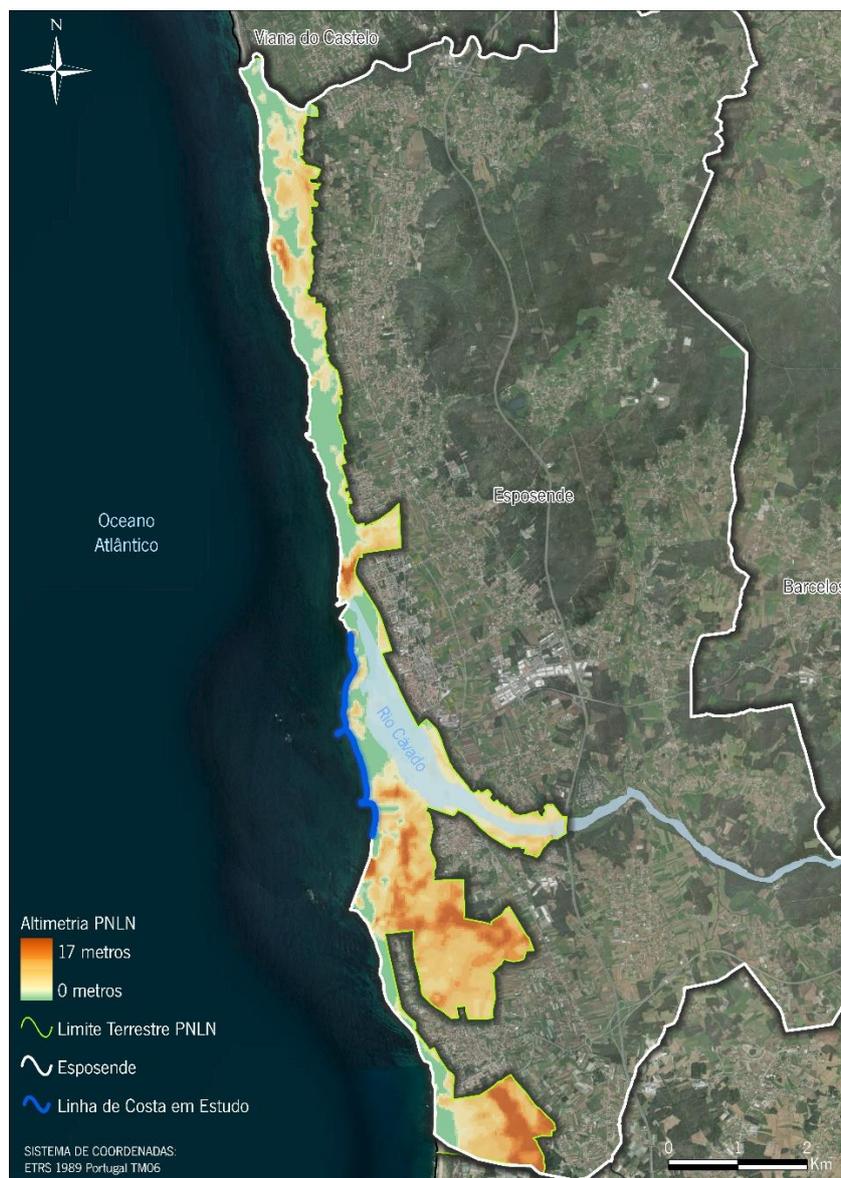


Figura II - 3: Caracterização hipsométrica do PNLN.
Fonte: Elaboração própria com base no MDT de 2018.

Os geoindicadores identificados na zona de estudo revelam a existência de sucessivos ambientes de diferente génese, controlados por variações do nível do mar e do clima e pela atuação de movimentos ligados à neotectónica (Granja, 1999).

Do ponto de vista geomorfológico, a área de estudo está inserida nos terrenos baixos e litorais da Orla Mesocenozóica Ocidental e nos maciços graníticos da zona centro-ibérica.

A hidrografia assenta em bacias hidrográficas múltiplas, pequenas a médias, de baixa altitude média resultando numa rede hidrográfica densa e frequente, da qual se destaca a bacia hidrográfica do Cávado.

A orientação das vertentes para O/SO apresentam-se cobertas por coluviões quaternários.

O relevo traduz-se numa peneplanície e vale/encosta, atingindo altitudes que vão desde a cota 0 metros até aos 17 metros.

Segundo (Granja, 1990), na área de estudo distinguem-se as seguintes unidades: (1) arriba fóssil mais antiga, (2) plataforma alta, (3) arriba fóssil mais recente, (4) plataforma baixa constituída por duas subunidades com características diferentes, (5) dunas mais antigas, (6) praias e dunas atuais.

Ao contrário da margem norte do Rio Cávado, no sul do Rio Cávado, onde se situa a área de estudo, a morfologia é bastante plana. A plataforma baixa tem uma largura variável, ocupando quase toda a zona costeira. As praias são arenosas e são delimitadas por arribas de erosão em dunas parabólicas que cobrem uma necrópole medieval na aldeia de Fão. A rápida dinâmica de erosão contribui para a perda de praias, não só por recuo, mas também por galgamento marinho (G. S. de Carvalho et al., 2006).

Na Praia de Ofir observam-se poucas dunas sem qualquer tipo de construções no extremo norte da Praia de Ofir, junto ao esporão norte de Ofir. Nessa praia existem edifícios habitacionais sobre as dunas, estando em risco de destruição pelos agentes de erosão costeira.

Na Restinga de Ofir e na Praia da Bonança existem dunas frontais intercaladas com depressões intradunares, sendo também visíveis corredores eólicos voltados para a frente oceânica, iniciados pelas depressões intradunares, e agudizadas pelo pisoteio (Granja, 1999).

2.4. Uso e Ocupação do Solo

A informação sobre a ocupação do solo é um aspeto muito importante num espectro de domínios científicos, por exemplo para compreender as interações fundamentais entre a atmosfera e a terra e o seu impacto no clima e na biodiversidade (Hollmann *et al.*, 2013; Pettorelli *et al.*, 2016).

Na parte terrestre do Parque Natural do Litoral Norte, estão presentes 7 usos de solo de Nível 1, segundo a COS (Carta de Uso e Ocupação do Solo): Florestas (25,86% - 340,6 ha); Agricultura (25,55% - 336,4 ha); Massas de Água (14,39% - 189,2 ha); Espaços Descobertos (11,87% - 156,4 ha); Matos (7,85% - 103,4 ha); Territórios Artificializados (7,38% - 97,3 ha); Zonas Húmidas (7,10% - 93,5 ha).

Os 5 km do segmento costeiro em análise são ocupados por praias, dunas e areais costeiros segundo as classes de Nível 4 da COS2020. Contudo, a classe de uso do solo seguinte para o interior diz respeito ao tecido edificado descontínuo ou instalações turísticas, numa extensão de 1,2km, aumentando a perigosidade do risco de erosão costeira. Os restantes 3,8km são ocupados por florestas, pelo que, em situação de erosão costeira e tendo em conta que se trata de uma área de proteção natural, os valores naturais desta região encontram-se fortemente ameaçados.

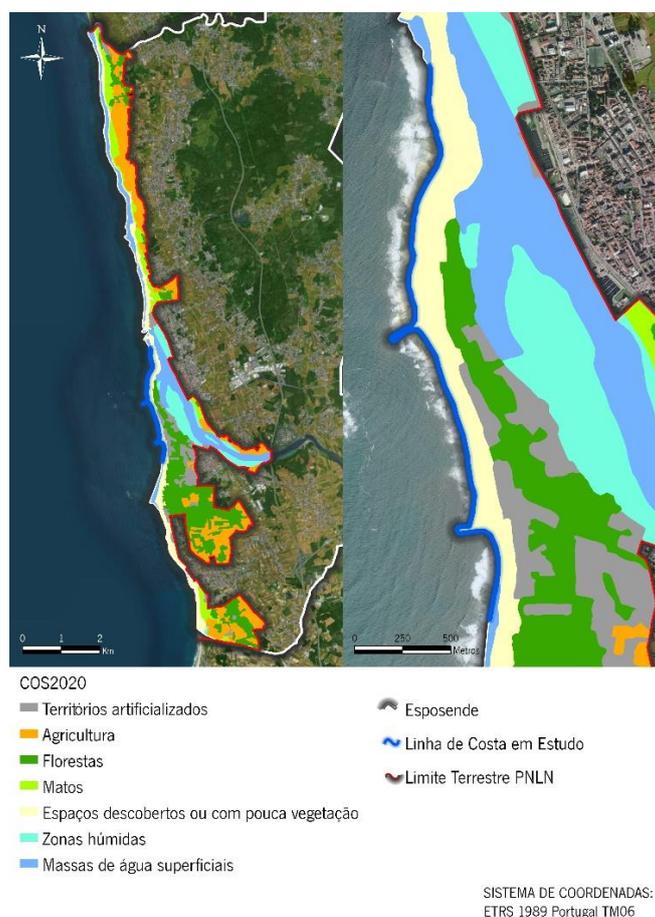


Figura II - 4: Mapa dos Usos e Ocupação do Solo no PNLN e no segmento costeiro em análise.
Fonte dos dados: COS2020.

***CAPÍTULO III – PROPOSTAS METODOLÓGICAS PARA A
QUANTIFICAÇÃO DA TAXA DE MIGRAÇÃO COSTEIRA***

3.1. Indicadores de Posição da Linha de Costa

A definição ideal do conceito “linha de costa” é a de que esta coincide com a interface física entre a terra e a água (Boak & Turner, 2005). Esta definição, aparentemente simples é, na prática, difícil de ser aplicada, sendo que a linha de costa está em constante mudança ao longo do tempo devido principalmente à dinâmica dos níveis de água, como ondas, marés, águas subterrâneas, tempestades, sedimentação e escoamento. Assim, a linha de costa deve ser compreendida em termos temporais, sendo que para determinado estudo, o indicador de linha de costa deve ser o mesmo para cada momento de análise de forma a reduzir a incerteza do resultado.

Na Figura III - 1 estão ilustrados alguns dos vários indicadores de posição de linha de costa. Todos estes indicadores apresentam algumas incertezas, contudo, alguns indicadores apresentam menos incertezas que outros.

Legenda:

- A - Topo da arriba
- B - Base da arriba
- C - Margem terrestre da estrutura de proteção costeira
- D - Linha de vegetação dunar estável terrestre
- E - Linha de vegetação mais próxima ao mar
- F - Escarpa de erosão
- G - Linha de detritos
- H - Antigo nível de água da maré alta
- I - Nível da água da maré alta anterior
- J - Linha média da maré alta
- K - Linha da interface do seco/molhado
- L - Ponto de saída da água subterrânea
- M - Linha de água instantânea
- N - Intensidade máxima das ondas
- O - Linha média de maré-baixa
- P - Ponta da praia

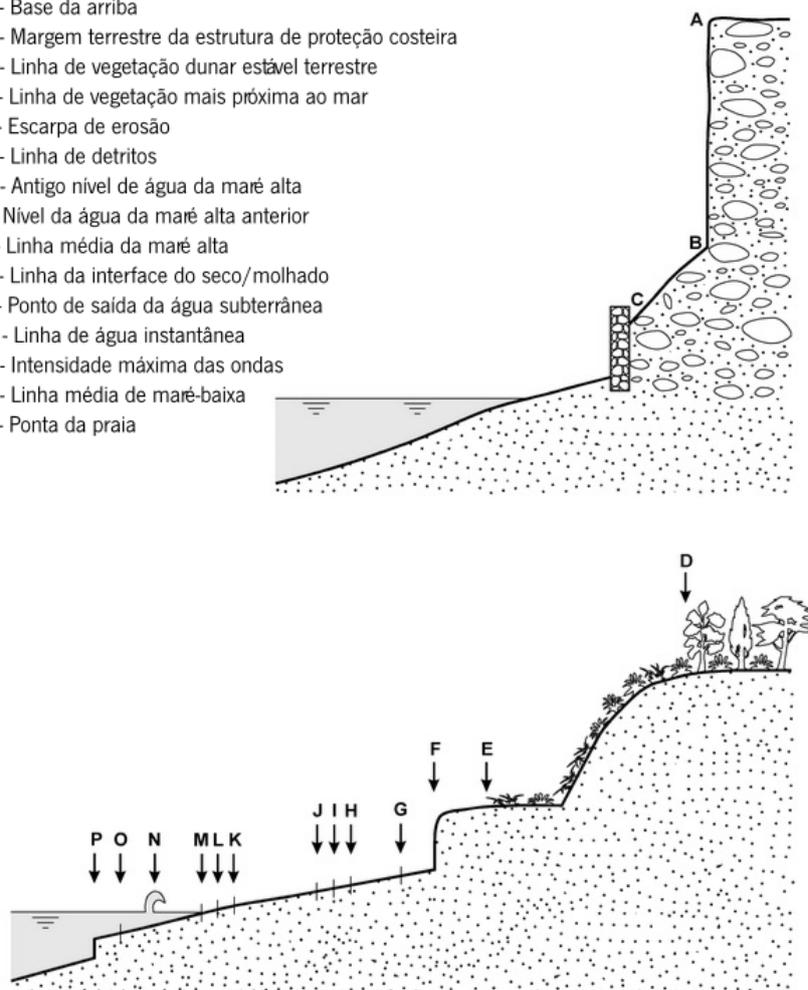


Figura III - 1: Indicadores de posição da linha de costa

Fonte: Adaptado de Boak & Turner (2005)

Um dos indicadores mais utilizados pelos investigadores é a linha que define a interface entre o seco e o molhado, contudo, essa linha varia, por um lado, conforme a altura da maré anterior ao momento da imagem, no caso de a maré estar a descer, e, por outro lado, caso a maré esteja a subir, essa linha corresponde à linha de maré alta. Por isso, este indicador poderá contribuir com algumas incertezas sobre os resultados.

Outro dos indicadores mais utilizados é a linha de vegetação. Este é um dos indicadores com menor variação ao longo do tempo, ainda assim, apresenta algumas incertezas, nomeadamente o facto de, numa praia com areal extenso, a linha de vegetação poder manter-se igual ao longo dos anos, apesar de poder estar a ocorrer uma alteração da linha de costa, ou, o facto de existirem outras causas para a variação da linha de vegetação como o pisoteio, a plantação ou nascimento de nova vegetação, sem relação com a variação da linha de costa.

Na realização deste trabalho, o indicador de posição de linha de costa utilizado foi a linha do topo da duna/arriba (Figura III - 2). Este indicador é dos que oferecem menor grau de incerteza, sendo que a sua posição não varia com muita frequência como a posição das marés, ou a linha de detritos. Além disso, a posição do topo de duna está fortemente relacionada com a erosão costeira, sendo que a sua posição depende exclusivamente com o nível máximo que a linha de costa pode atingir. A principal incerteza deste indicador é que, nos casos em que a linha de costa está a recuar, o topo da duna mantém-se na mesma posição, apesar do efetivo recuo da linha de costa. Outra incerteza deste indicador é que pode ocorrer destruição ou acréscimo dunar causados por outros motivos sem relação com o avanço do nível da linha de costa. Por isso, é importante que nestes estudos, os autores façam pré-testes e conheçam as características destes locais.



Figura III - 2: Exemplo da posição da linha de maré alta anterior.
Fonte: Elaboração própria através de levantamento aéreo

3.2. Levantamentos Aéreos

3.2.1. Materiais e Metodologias

A monitorização da erosão costeira requer a utilização de equipamento tecnológico relativamente recente e softwares de forma a obter, processar e interpretar os dados de forma a alcançar resultados com bastante rigor e precisão.

Relativamente ao equipamento tecnológico, foi utilizado:

- Spectra Geospatial SP60 (recetor GPS);
- DJI Phantom 4 Pro V2.0 (drone);
- Apple iPad Mini (ligação ao comando e planeamento de voo).

Em relação aos softwares, foi utilizado:

- MobileMapper Field (coletor dos dados de GPS);
- SPace (conexão ao recetor do GPS);
- Pix4Dcapture (planeamento de voo);
- Agisoft Metashape Pro V2.0.1 (processamento fotogramétrico);
- ArcGIS Pro (elaboração cartográfica e cálculos volumétricos);
- *Digital Shoreline Analysis System* (Add-in para ArcMap 10.8).

DJI Phantom 4 PRO V2.0

O DJI Phantom 4 Pro Figura III - 3 é um drone quadrocóptero com cerca de 1375 gramas, pelo que, segundo os regulamentos nacionais é necessária a licença de voo A1-A3 para ser pilotado. Este drone é constituído por quatro hélices, um GPS, uma unidade IMU, bússola magnética, um motor responsável por cada hélice, um suporte de aterragem, um *gymbal*, uma câmara, um compartimento para uma bateria e portas de conexão (DJI, 2023).

As suas características motrizes permitem que o drone atinja uma velocidade máxima de 70 Km/h com capacidade de resistir a ventos até aos 10 metros/segundo (36 Km/h), característica importante em áreas costeiras, fortemente afetadas pelos ventos oceânicos. O seu tempo de voo real é de 23 minutos por bateria, dependendo sempre das condições atmosféricas e da velocidade e altitude de voo. Relativamente à câmara, este drone está equipado com uma câmara de 20 Megapixéis num sensor de 1 polegada, com um FOV (*Field of View*) de 84° (DJI, 2023), sendo capaz de captar aproximadamente, em apenas uma fotografia, uma área de 450 m² a 65 metros de altitude.

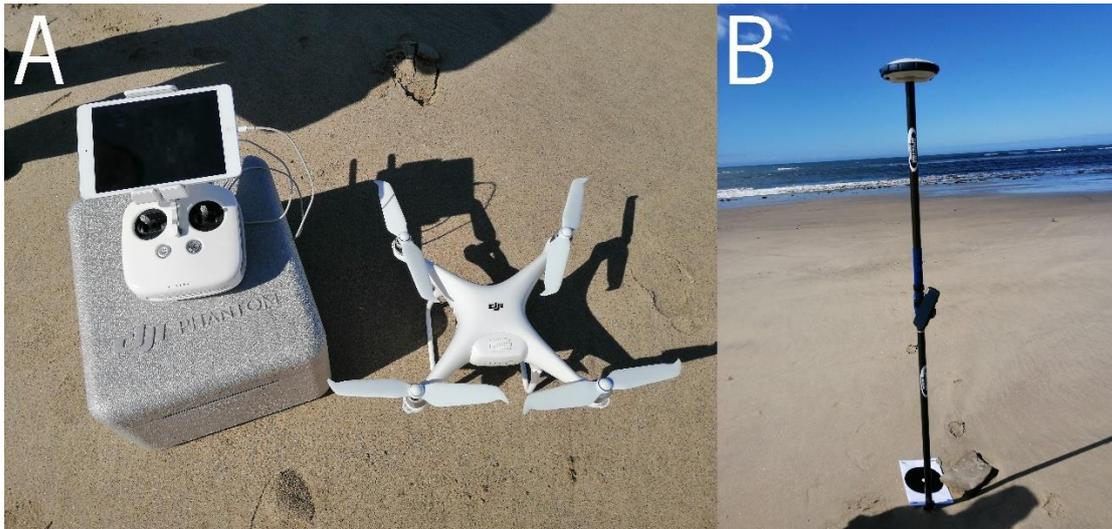


Figura III - 3: A- DJI Phantom 4 Pro; B- GPS Spectra Geospatial SP60
Fonte: Fotografias obtida pelo autor

Pix4dcapture

O PIX4Dcapture é uma aplicação móvel, disponível para Android e iOS, para planeamento de voos de drone para aquisição de dados aéreos para mapeamento e modelação 2D e 3D. Com as suas missões autónomas, esta aplicação é uma ferramenta poderosa no mercado da fotogrametria.

Ground control points

De forma a obter uma correta orientação, correção e alinhamento das fotografias aéreas, é necessário o levantamento de pontos de controlo no terreno com recurso ao GPS (Spectra Geospatial SP60).

Estes pontos devem ser facilmente identificados nas fotografias aéreas, sendo necessário existir, no mínimo, um GCP em cada fotografia de forma a aumentar a precisão. Assim sendo, são frequentemente escolhidos pontos artificiais de fácil identificação, como tampas de saneamento, marcas rodoviárias, passeios, etc. Contudo, estes elementos não estão presentes na praia e, por isso, foi necessário recorrer a outras alternativas, como a pintura de alvos com tinta biodegradável (preferencialmente na parte mais interior das praias) e a marcação de cruces na própria areia, preferencialmente em zonas do areal mais húmidas, de forma a realçar melhor as marcações, conforme se verifica na Figura III - 4.

Como foram utilizadas marcações na areia como GCP o levantamento dos pontos de controlo foi feito antes de se realizarem os voos de drone para que estes apareçam nas fotografias aéreas. A utilização de elementos fixos como pontos de controlo apresentam mais vantagens, como a utilização destes GCP várias vezes em voos diferentes e a possibilidade de coletar as coordenadas em qualquer altura, ao

contrário das marcações na areia que poderão desaparecer em algum tempo devido à subida das marés ou à passagem de pessoas.



Figura III - 4: Exemplos de pontos de controlo no terreno.

Para que as coordenadas levantadas sejam o mais precisas possíveis, utilizou-se a técnica RTK (*Real Time Kinematic*). Esta técnica corrige e reduz erros de medições provocados por efeitos da ionosfera, troposfera, órbita dos satélites GPS, etc.

No terreno foram levantados 21 pontos de controlo, distribuídos por uma área de 92,1 hectares, resultando numa média de 1 ponto de controlo a cada 4,3 hectares.

Os pontos de controlo no terreno coletados por GPS são extremamente precisos com uma precisão horizontal média de 1,3 centímetros e uma precisão vertical média de 4,3 centímetros.

A tabela dos *Ground Control Points* está no ANEXO I, na qual constam, para cada ponto as coordenadas, a altitude, a precisão e o sistema de coordenadas. Além da tabela, encontra-se graficamente representada a distribuição espacial dos GCP no ANEXO II.

Planeamento de voo

A primeira etapa do planeamento de voo está relacionada com as condições meteorológicas, sendo que estas têm forte influência no comportamento e eficácia do drone e na qualidade dos resultados. Assim sendo, foi escolhido um dia com céu limpo ou pouco nublado, e com pouco vento.

A seguinte etapa do planeamento de voo diz respeito às marés, pelo que foi escolhido um dia em que o coeficiente (amplitude) de marés fosse elevado, e uma hora em que a altura da maré fosse baixa, assim é possível cobrir uma maior área de praia.

Devido à extensa área de voo, as 3 baterias que acompanham o DJI Phantom 4 Pro não foram suficientes para realizar os voos num único dia. Deste modo, foram escolhidos dois dias com características meteorológicas e de maré semelhantes, conforme descrito na Tabela III - 1:

Data/Hora	Duração de voo	Nº de fotografias	Altitude de voo	Altura da maré baixa	Velocidade do vento
17/04/2023 10:11h	61 minutos	650	65 metros	1,1 metros	8 km/h
19/04/2023 10:28h	71 minutos	1228	65 metros	0.6 metros	10 km/h

Tabela III - 1: Características técnicas dos levantamentos aéreos

A terceira etapa do planeamento de voo prende-se com a criação das linhas de voo e a definição dos parâmetros de voo como a altitude, as sobreposições lateral e frontal, o ângulo da câmara e a velocidade do drone. Esta fase foi feita através da aplicação PIX4Dcapture e uma das principais vantagens desta aplicação é o facto de esta mostrar o tempo de voo previsível e a resolução espacial à medida que são ajustados os parâmetros de voo, permitindo ao utilizador optar por um voo de maior qualidade ou por um menor tempo de voo, consoante o objetivo de cada trabalho.

Na Figura III - 5 encontram-se os parâmetros de voo definidos no PIX4Dcapture, sendo que, em conjunto com as características do drone, a aplicação previu uma resolução espacial de 2,94 cm/pix.

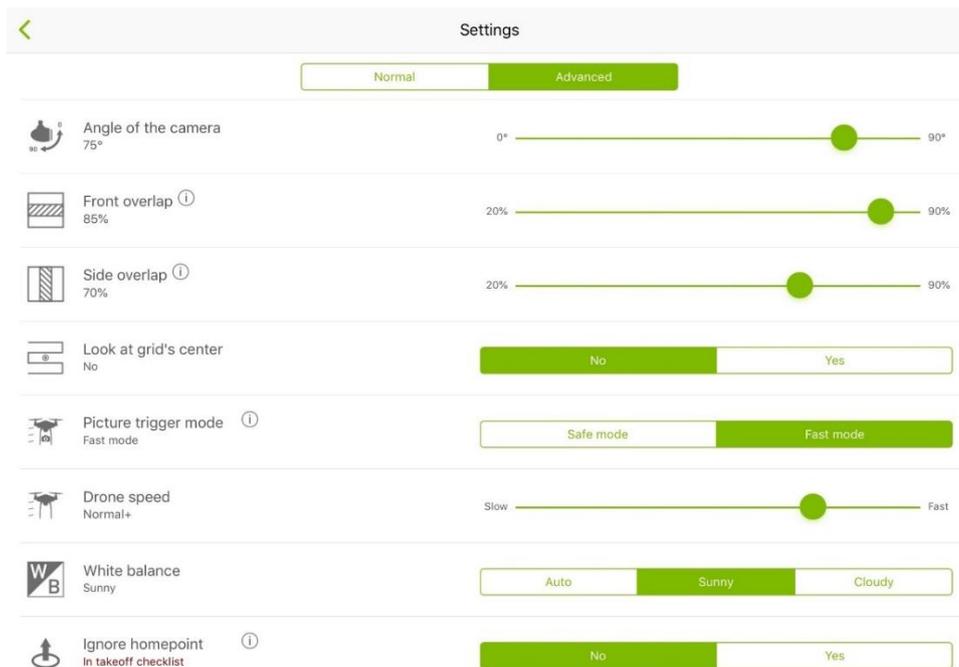


Figura III - 5: Parâmetros dos voos no PIX4Dcapture.

Fonte: *Printscreen* da aplicação PIX4Dcapture

Tendo em conta o objetivo deste estudo, os levantamentos aéreos foram efetuados com o tipo de voo de linhas paralelas. Com a altitude de voo de 65 metros e uma sobreposição frontal de 85%, uma boa resolução vertical e horizontal está assegurada, evitando assim a necessidade de realizar o trabalho com o tipo de voo de linhas cruzadas, reduzindo para metade o tempo de voo.

3.2.2. Processamento Fotogramétrico

Terminados os levantamentos aéreos, é necessário processar as 1878 fotografias aéreas obtidas. Para tal, foi utilizado o software Agisoft Metashape Professional na sua versão 2.0.1, que apresenta um fluxo de trabalho extremamente simples de executar e consiste em várias fases de processamento até se obter os dois produtos desejados – o ortofotomapa e o Modelo Digital de Superfície. No final do processamento fotogramétrico, é gerado um relatório automático com as especificações técnicas dos resultados obtidos, bem como todos os parâmetros de cada passo (ANEXO III).

Alinhamento das imagens

Após a importação de todas as fotografias, o primeiro passo é o alinhamento das imagens. Este é o primeiro e o mais importante passo no processamento fotogramétrico, uma vez que a qualidade e a precisão de todas as etapas seguintes dependem da precisão do alinhamento das imagens. Durante o processo de alinhamento, o software compara cada fotografia com todas as outras fotografias de forma a descobrir a posição e a orientação da câmara para cada fotografia e constrói uma nuvem de pontos esparsa com base na técnica SfM, explorada no sub-capítulo 1.4.1. A definição dos parâmetros para o alinhamento das imagens encontra-se na Figura III - 6.

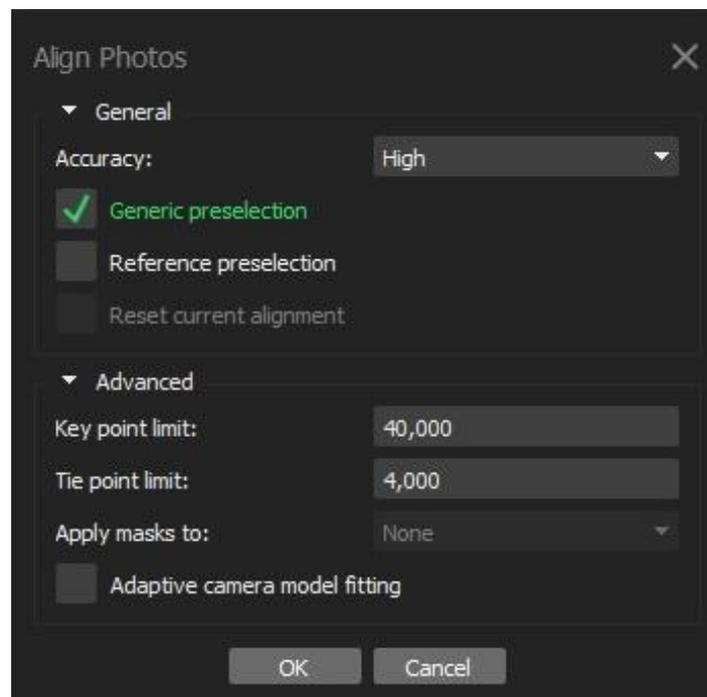


Figura III - 6: Parâmetros para o alinhamento das imagens e geração da nuvem de pontos esparsa.
Fonte: *Printscreen* do software Agisoft Metashape

Das 1878 fotografias, foram alinhadas apenas 1847 dado que as imagens não alinhadas corresponderem a fotografias do mar, ou seja, uma superfície bastante homogênea e em que o software não consegue distinguir os pontos em comum nas diferentes imagens. Esta etapa resultou numa nuvem constituída por 1 252 863 pontos (Figura III - 7).

No ANEXO IV estão representadas as posições de cada fotografia aérea com a sobreposição das fotografias, indicando quais as zonas que foram mais vezes captadas pelas imagens aéreas.

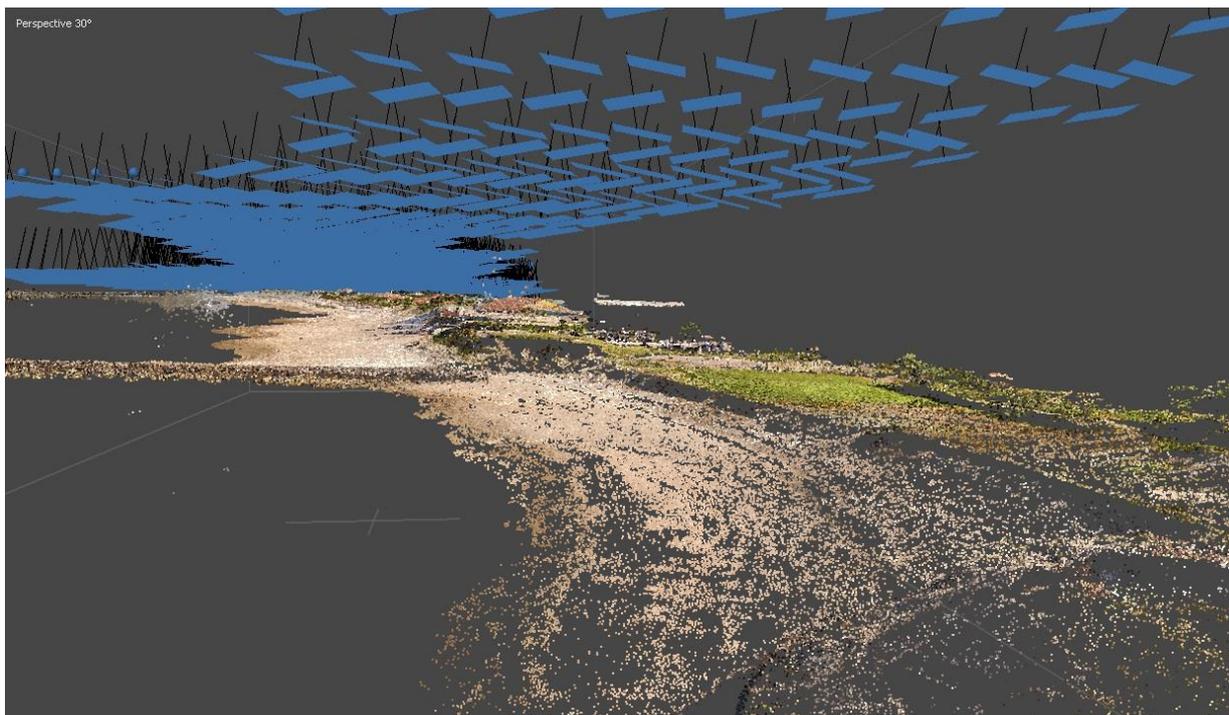


Figura III - 7: Nuvem de pontos esparsa com a posição e orientação das câmaras.
Fonte: *Printscreen* do software Agisoft

Importação dos Ground Control Points

Após o alinhamento das imagens e o cálculo da posição das câmaras, é necessário importar os pontos de controlo. Antes de se adicionarem os GCP, é necessário informar ao software qual o sistema de coordenadas utilizado em cada fonte de dados e qual o pretendido para a produção do ortofotomapa e do MDT. Segundo a DJI, os GPS dos seus drones utilizam o WGS 84. O GPS SP60 coletou os pontos de controlo no sistema de coordenadas ETRS89/Portugal TM06, o mesmo que irá ser utilizado na produção dos ortofotomapas e dos MDT. Depois de introduzir os sistemas de coordenadas é necessário converter as coordenadas de forma a evitar erros de projecção. Ao adicionar os pontos de controlo, o software coloca automaticamente um marcador na nuvem de pontos esparsa no local correspondente a cada coordenada, contudo, essa colocação é feita de acordo com as coordenadas do GPS do drone alocadas a cada imagem aérea. No entanto, o GPS do drone não é tão rigoroso quanto o GPS SP60. Como a colocação automática dos marcadores não corresponde à localização real dos GCP, é necessário ajustar manualmente a sua posição em cada imagem, daí a importância da atribuição dos pontos de controlo a elementos que se distingam facilmente do ambiente envolvente. Após serem ajustados os pontos de controlo, é necessário realizar a otimização do alinhamento das imagens devidamente marcadas com

pontos de controle, assegurando que o ortofotomapa não apresente distorções e que o MDT seja o mais rigoroso possível.

Construção da nuvem de pontos densa

Após o segundo alinhamento das imagens, é necessário construir a nuvem de pontos densa. O software permite gerar e visualizar um modelo denso de nuvens de pontos. Com base nas posições estimadas da câmara, o programa calcula a informação de profundidade para os pares de imagens sobrepostas, gerando mapas de profundidade para cada par de imagens. Depois da combinação de todos os mapas de profundidade num único, estes são transformados numa nuvem de pontos densa. A quantidade de mapas de profundidade define um valor de confiança para cada ponto, que pode ser posteriormente utilizado com um filtro de forma a observar apenas os pontos com um elevado valor de confiança (Agisoft, 2020).

A nuvem de pontos gerada nesta fase é constituída por 303 801 936 pontos de alta qualidade (Figura III - 8).



Figura III - 8: Nuvem de pontos densa.
Fonte: *Printscreen* do software Agisoft

Construção do modelo digital de superfície e do ortofotomapa

Uma nuvem de pontos densa de alta qualidade como a que foi gerada, permite criar um Modelo Digital de Superfície de elevada resolução sem que seja necessária a criação de uma malha 3D de polígonos e a sua texturização, permitindo economizar algum tempo no processamento das imagens.

O Modelo Digital de Superfície é baseado na nuvem de pontos densa, portanto, o seu nível de qualidade influencia a precisão do MDS.

Após a criação do MDS o software permite a construção do ortofotomapa. O ortofotomapa é constituído por múltiplos mosaicos, ou seja, segmentos das imagens aéreas. A superfície do ortofotomapa é baseada no MDS previamente originado, permitindo que cada mosaico seja unido de forma a originar um “ortofotomapa verdadeiro”, um conceito que consiste numa representação vertical das imagens aéreas sem distorções ou rebatimentos, sem as fachadas dos edifícios, sem obstrução de ruas estreitas em espaço urbano, ou seja, uma reprodução constante da vista aérea vertical a 90°, a partir de qualquer ponto de vista do visualizador (Boccardo *et al.*, 2004).

Os parâmetros para a construção do ortofotomapa foram definidos conforme a Figura III - 9. Tal como referido anteriormente, o sistema de coordenadas escolhido para a reprodução do ortofotomapa foi o ETRS89/Portugal TM06.

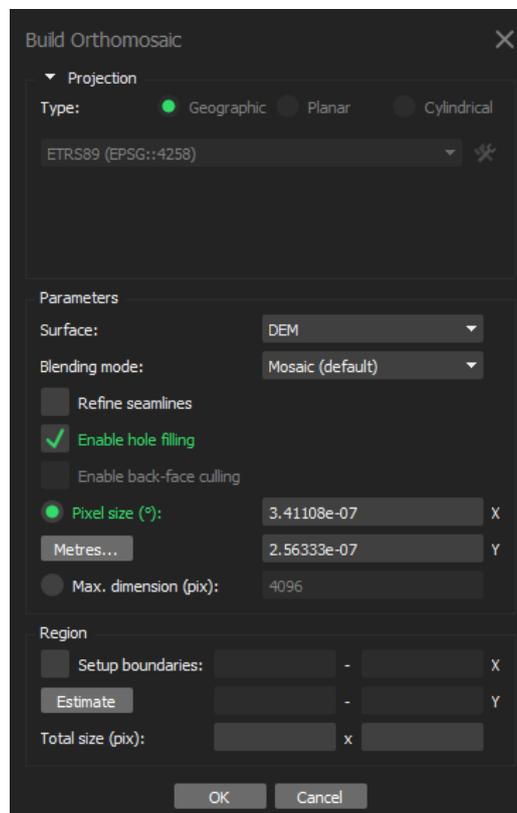


Figura III - 9: Parâmetros para a construção do ortofotomapa.

Fonte: *Printscreen* do software Agisoft

3.3. ANÁLISE 1 – Análise das Alterações Topográficas e Volumétricas

3.3.1. Materiais e Metodologias

Para analisar as alterações topográficas foram utilizados dados de monitorização costeira do Programa COSMO (<https://cosmo.apambiente.pt/>). Este programa consiste na recolha, processamento e análise de informação sobre a evolução das praias, dunas, fundos submarinos próximos e arribas ao longo da faixa costeira de Portugal Continental e foi concebido e desenvolvido pela Agência Portuguesa do Ambiente entre 2018 e 2021.

Assim, foi utilizado o MDT de 2018 do Programa COSMO e o MDS de 2023 obtido através dos levantamentos aéreos efetuados.

Como os dados altimétricos de 2018 correspondem a um Modelo Digital de Terreno e os de 2023 correspondem a um Modelo Digital de Superfície, foi necessário fazer recortes na área de estudo para que a análise das alterações altimétricas e volumétricas não considere os edifícios e vegetação que estão no MDS, mas não estão no MDT, evitando resultados irreais.

Assim, foram feitos 3 recortes ao longo da área de estudo (Figura III - 10)– na Restinga de Ofir, na Praia de Ofir e na Praia da Bonança. Para isto, foi utilizada a ferramenta “*Extract by Mask*” no ArcGIS Pro, obtendo, desta forma, 6 Modelos Digitais, 2 para cada área específica.



Figura III - 10: Localização das 3 áreas específicas.

Fonte: Elaboração própria

Variações altimétricas

Para o cálculo das variações altimétricas foi utilizada a ferramenta “*Raster Calculator*” do ArcGIS Pro, com a seguinte expressão: “MDT2023 – MDS2018”, obtendo assim um novo *raster*, com a mesma resolução espacial.

Com os resultados obtidos, é necessário classificar os dados para que, na representação gráfica, as cores a vermelho correspondam a perdas altimétricas e as cores verdes a ganhos altimétricos, bem como a atribuição da cor preta a pixels sem variação altimétrica.

Foram também realizados perfis topográficos de forma a fornecer uma análise mais detalhada sobre as variações altimétricas. As *shapefiles* do tipo linha que correspondem aos perfis topográficos, foram convertidas em pontos com um espaçamento de 10cm entre eles, utilizando a ferramenta “*Generate Points Along Lines*”. De seguida foram extraídos os valores altimétricos correspondentes a cada ponto para cada ano através da ferramenta “*Extract Multi Values to Points*”. Os perfis topográficos foram posteriormente editados no software MS Excel.

Variações volumétricas

O cálculo da variação altimétrica foi elaborado com base na fórmula matemática do cálculo simples do volume – largura x comprimento x altura, em que a largura e o comprimento são o tamanho do pixel, ou a também a área do pixel, e altura é o valor do pixel. Desta forma foi utilizada a ferramenta “*Raster Calculator*” do ArcGIS Pro, com a expressão: “MDT2018 * (0,1 * 0,1)” em que 0,1 é o tamanho do pixel do MDT de 2018 em metros. A mesma expressão foi utilizada para calcular os volumes para 2023, substituindo apenas o tamanho do pixel que é 0,06. Este processo foi repetido para cada uma das 3 áreas específicas.

Como a ferramenta “*Raster Calculator*” origina um ficheiro raster, é necessário gerar uma tabela com as estatísticas desse raster. Para tal, foi aplicada a ferramenta “*Zonal Statistics as Table*”, originando uma tabela com várias estatísticas sobre a quantidade de pixels no raster, bem como os valores máximos, mínimos, médios e a sua soma, valores esses que correspondem ao volume de cada pixel.

Com as medições volumétricas obtidas foi calculada a diferença entre os dois anos de análise.

Tendo em conta que as alterações volumétricas não ocorreram da mesma forma em toda a área de estudo, foi utilizada a ferramenta “*Raster Calculator*” para calcular a diferença volumétrica entre 2018 e 2023 e representar a sua distribuição espacial, de forma a entender quais os locais onde a perda de sedimentos foi maior ou menor.

3.4. ANÁLISE 2 – *Digital Shoreline Analysis System*: Análise e Previsão das Alterações da Linha de Costa

3.5.1. Materiais e Metodologias

Digital Shoreline Analysis System

O DSAS é um software *add-in* para qualquer versão superior à 10.4 do ArcMap da Esri. Este *plugin* foi desenvolvido originalmente no início dos anos 90 pelo *United States Geological Survey* (USGS) e foi sofrendo numerosas atualizações e afinamentos ao longo do tempo. Permite ao utilizador calcular estatísticas da taxa de alteração a partir de múltiplas posições históricas da linha de costa. Além disso, este software inclui um modelo beta de previsão da linha de costa para 10 e 20 anos com o devido grau de incerteza.

Neste trabalho, a análise das alterações da linha de costa considerou a posição da linha de costa para os anos de 2006, 2010, 2013, 2016, com recurso a imagens de satélite do Google Earth Pro, 2019, através do ortofotomapa de 2019 do Programa COSMO, e 2023, através do ortofotomapa obtido através dos levantamentos aéreos. Para a definição da posição da linha de costa foi utilizado o topo da duna/arriba, conforme explicado no subcapítulo 3.1.

A primeira etapa desta análise envolve a criação de uma *Geodatabase*, uma base de dados geoespacial onde serão armazenados todos os dados decorrentes desta metodologia e sobre a qual o DSAS irá trabalhar. De seguida é necessário “desenhar” as linhas de costa para cada ano, através de uma *shapefile* do tipo Linha e editar a respetiva tabela de atributos, onde são definidos o seu comprimento, a data da linha de costa e a incerteza. Todas as *shapefiles* que irão ser utilizadas no DSAS, devem estar num sistema de coordenadas projetadas, sendo utilizado o ETRS 1989 UTM Zone 29N

Com as 6 linhas de costa desenhadas, utiliza-se a ferramenta “*Buffer*” com uma distância de 100 metros, para estabelecer a *baseline*. A *baseline* é uma linha construída pelo utilizador e serve de ponto de partida para cada transeto que interseta cada linha de costa. Essas interseções originam pontos que serão utilizados para calcular as taxas de alteração da linha de costa através da sua distância até à *baseline*.

De seguida, no DSAS, é necessário adicionar as *shapefile* criadas e definir os parâmetros sobre as características das linhas de costa e da *baseline* (Figura III - 11).

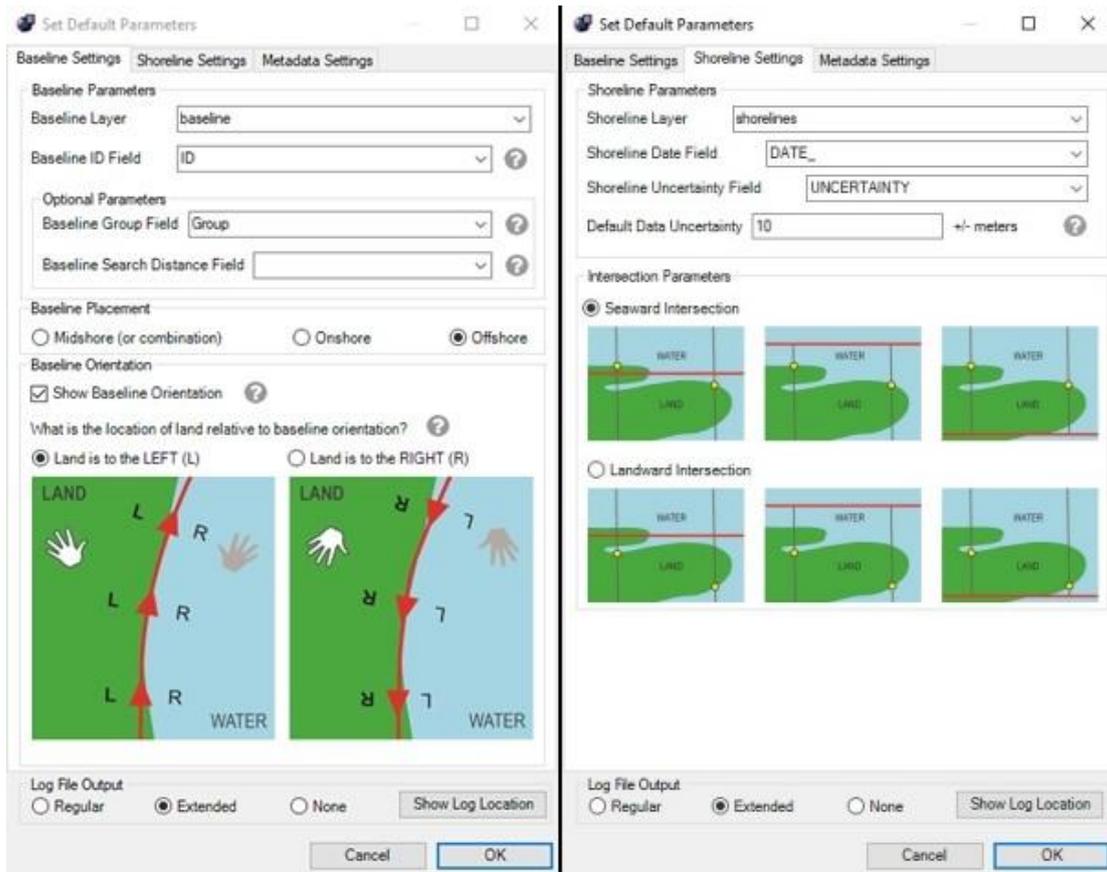


Figura III - 11: Parâmetros da baseline e das linhas de costa.
 Fonte: *Printscreen* do DSAS

Após a definição dos parâmetros, segue-se a criação dos transetos que irão servir de base para o cálculo das taxas de erosão. A criação dos transetos é feita de forma semi-automática através do *Digital Shoreline Analysis System*, sendo que é o utilizador que define as propriedades dos transetos (Figura III - 12). A primeira propriedade é a distância máxima, desde a *baseline*, que o software vai procurar por linhas de costa, e tendo em conta que a *baseline* está a 100 metros, essa seria a distância máxima até às linhas de costa. Contudo, deve considerar-se o facto de que a linha de costa avançou, e, por isso, excede os 100 metros iniciais. Dessa forma, para intercepar todas as linhas de costa foi definida uma distância máxima de 250 metros, garantido a interseção com todas as linhas de costa para toda a área de estudo. A segunda propriedade diz respeito ao espaçamento entre cada transeto, sendo estabelecida uma distância de 10 metros entre cada transeto. A terceira propriedade é a distância de suavização, sendo estabelecido o valor 100. Esta propriedade define o comprimento, o ângulo dos transetos, bem como a capacidade dos transetos se cruzarem entre si.

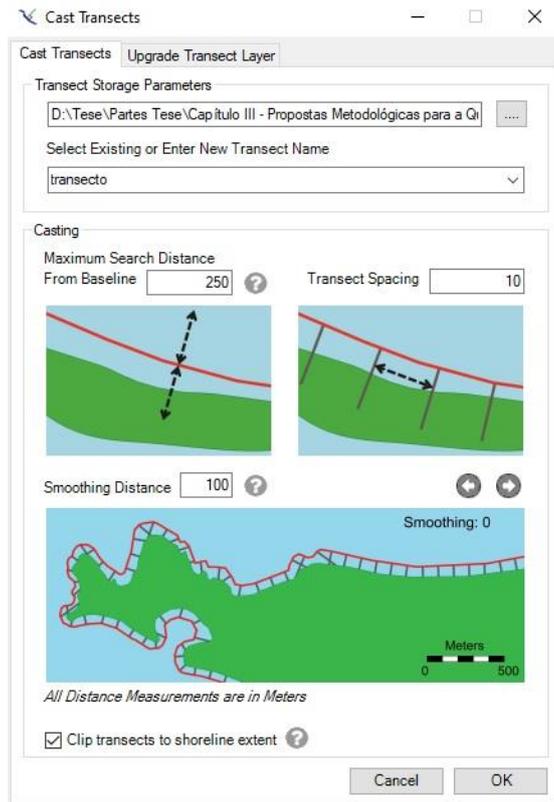


Figura III - 12: Propriedades dos transetos.
 Fonte: *Printscreen* do DSAS

De seguida, são calculadas as taxas de erosão costeira para cada transeto e, para este estudo, todas as taxas de erosão costeira serão calculadas, num total de 11 taxas. Contudo, dessas 11 taxas, as mais comumente utilizadas pela comunidade científica são as seguintes (Figura III - 13):

- *Net Shoreline Movement* (NSM): Distância, em metros, entre a linha de costa mais antiga e a linha de costa mais recente;
- *Shoreline Change Envelope* (SCE): Maior distância, em metros, entre todas as linhas de costa;
- *End Point Rate* (EPR): Alteração da linha de costa por ano, em metros. Calculadas através da divisão do NSM pelo número de anos de análise;

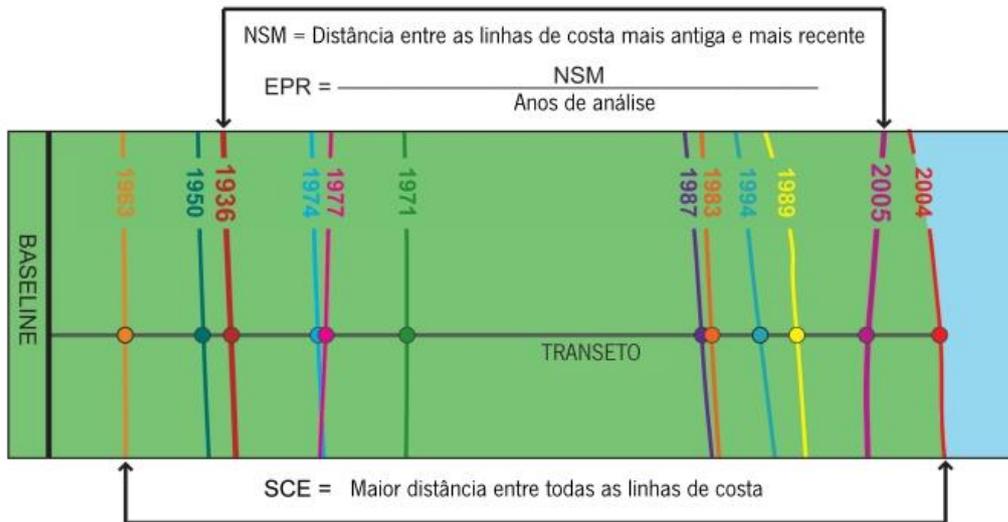


Figura III - 13: Esquema explicativo de três taxas de erosão costeira.
 Fonte: Adaptado de Himmelstoss *et al.* (2021)

Por fim, a previsão da linha costa de forma automática é feita no DSAS, através da ferramenta de previsão. Para este estudo foram previstas as posições da linha de costa para 10 e 20 anos com os respectivos graus de incertezas. Sendo uma ferramenta BETA (ainda em desenvolvimento), a previsão da linha de costa para o futuro é ainda acompanhada por um significativo grau de incerteza/erro.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Levantamentos Aéreos

4.1.1. Resultados

O processamento fotogramétrico gerou resultados de grande qualidade, incluindo um Modelo Digital de Superfície (Figura IV - 1) com uma resolução espacial de 5,69 cm/pix, com uma densidade de 308 pontos/m² e um Ortofotomapa (Figura IV - 2) com uma resolução espacial de 2,85 cm/pix. A elevada precisão destes dados deve-se ao facto de os voos terem sido realizados a baixa altitude e com uma elevada taxa de sobreposição. Esta elevada precisão dos dados permite analisar de forma eficaz as taxas de erosão costeira.

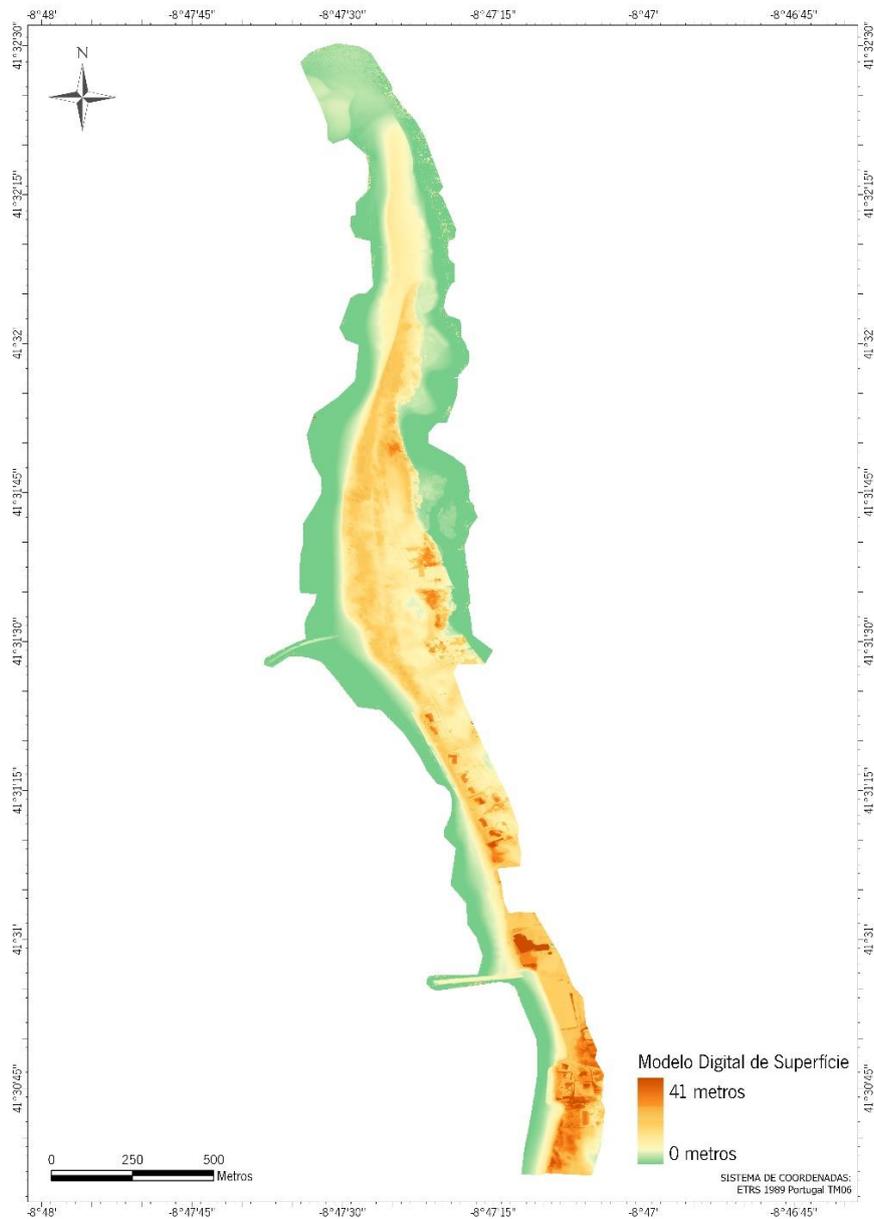


Figura IV - 1: Modelo Digital de Superfície da área de estudo.

Fonte: Elaboração própria



Figura IV - 2: Ortofotomapa da área de estudo
Fonte: Elaboração própria

A exportação destes dados foi feita em formato *.tif* no sistemas de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06.

4.2. ANÁLISE 1 – Análise das Alterações Topográficas e Volumétricas

4.2.1. Resultados e Análise

Restinga de Ofir

A área específica da Restinga de Ofir apresenta uma área de 99 329 m² e uma altitude máxima de 10 metros em toda a sua extensão.

Relativamente à variação altimétrica entre 2018 e 2023 (Figura IV - 3), a Restinga de Ofir registou ganhos máximos de 5,56 metros e perdas máximas de altitude de 7,51 metros. As zonas que registaram os ganhos de altitude estão concentradas em dois locais – na extremidade norte da Restinga e nas dunas a norte do esporão. Os ganhos altimétricos da extremidade norte correspondem a uma alimentação artificial da Restinga de Ofir durante os primeiros meses de 2023. A elevação de altitude que ocorreu a norte do esporão deveu-se principalmente à acumulação de sedimentos devido a esse esporão e também ao crescimento da vegetação existente entre 2018 e 2023. As variações altimétricas ocorreram de forma generalizada nesta área, em que a maior parte das perdas altimétricas estão associadas ao “abaixamento” das praias e ao desaparecimento das estruturas dunares (Figura IV - 3 A e Figura IV - 3B), com destaque para a extremidade norte onde a perda de área dunar foi de 12 973 m².

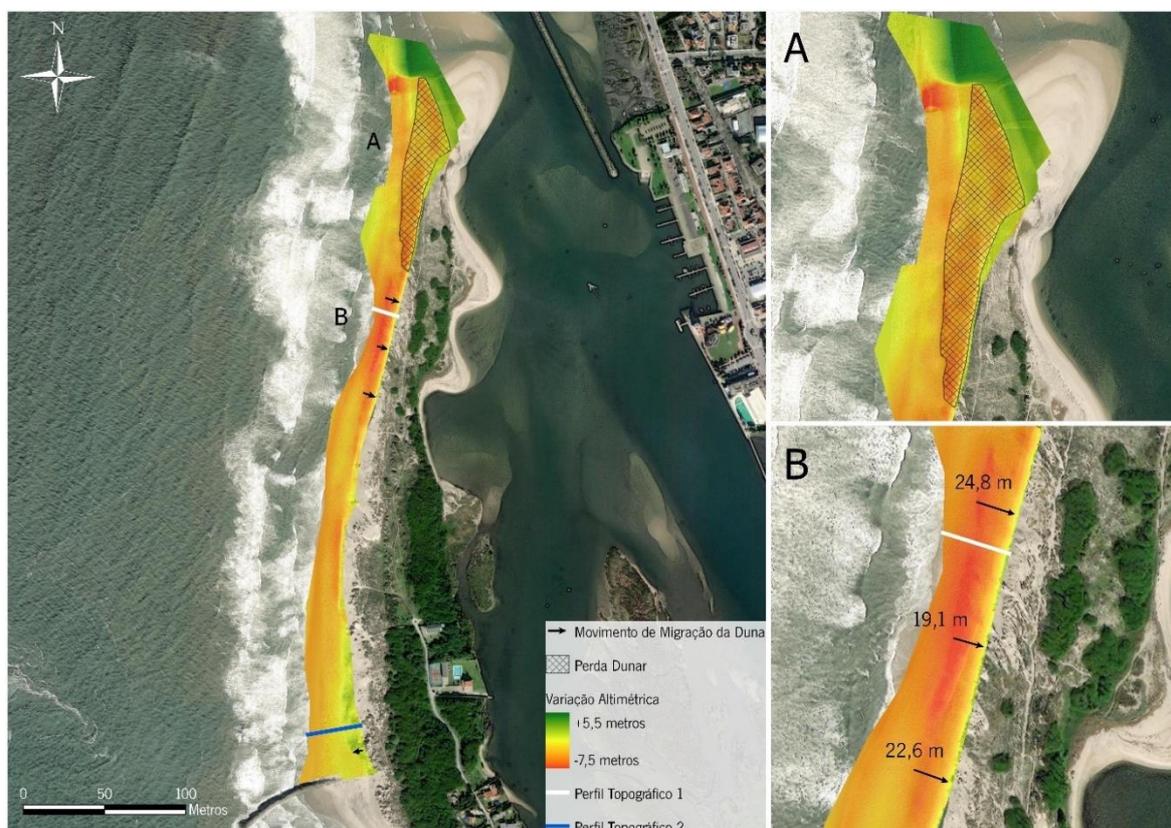


Figura IV - 3: Variação altimétrica na Restinga de Ofir entre 2018 e 2023.

Fonte: Elaboração própria

Analisando o Perfil Topográfico 1 (Figura IV - 4), verifica-se que os dados altimétricos de 2018 se iniciam, neste perfil, nos 3,5 metros de altitude, ao contrário dos 0,1 metros de 2023. Estas diferenças indicam a diminuição acentuada da área de praia. É visível o forte aumento da inclinação da duna, consequência da destruição causada pela erosão costeira. Este aumento de inclinação torna ainda mais suscetível a estabilidade da duna, sendo que a sua base se encontra agora mais exposta à agitação marítima.

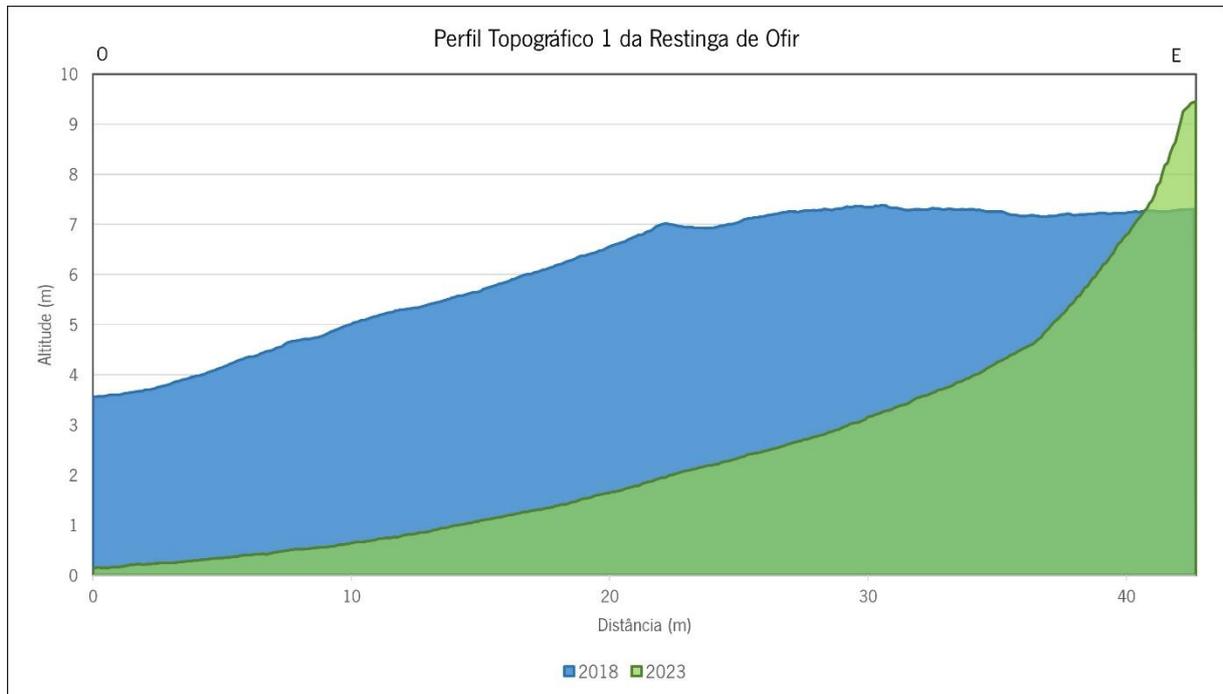


Figura IV - 4: Perfil Topográfico 1 da Restinga de Ofir.
Fonte: Elaboração própria

Relativamente ao Perfil Topográfico 2 (Figura IV - 5), localizado numa zona mais próxima ao esporão, constata-se que neste caso as alterações não são tão significativas como no perfil anterior. Isto acontece devido à proteção que o esporão confere a esta zona, permitindo a acumulação de sedimentos. Mesmo assim, é notório o aumento da inclinação e a diminuição do areal na zona de praia. Contudo, nas altitudes mais elevadas o perfil das dunas manteve-se relativamente igual ao de 2018, permitindo que neste local as dunas se mantenham relativamente estáveis durante algum tempo.

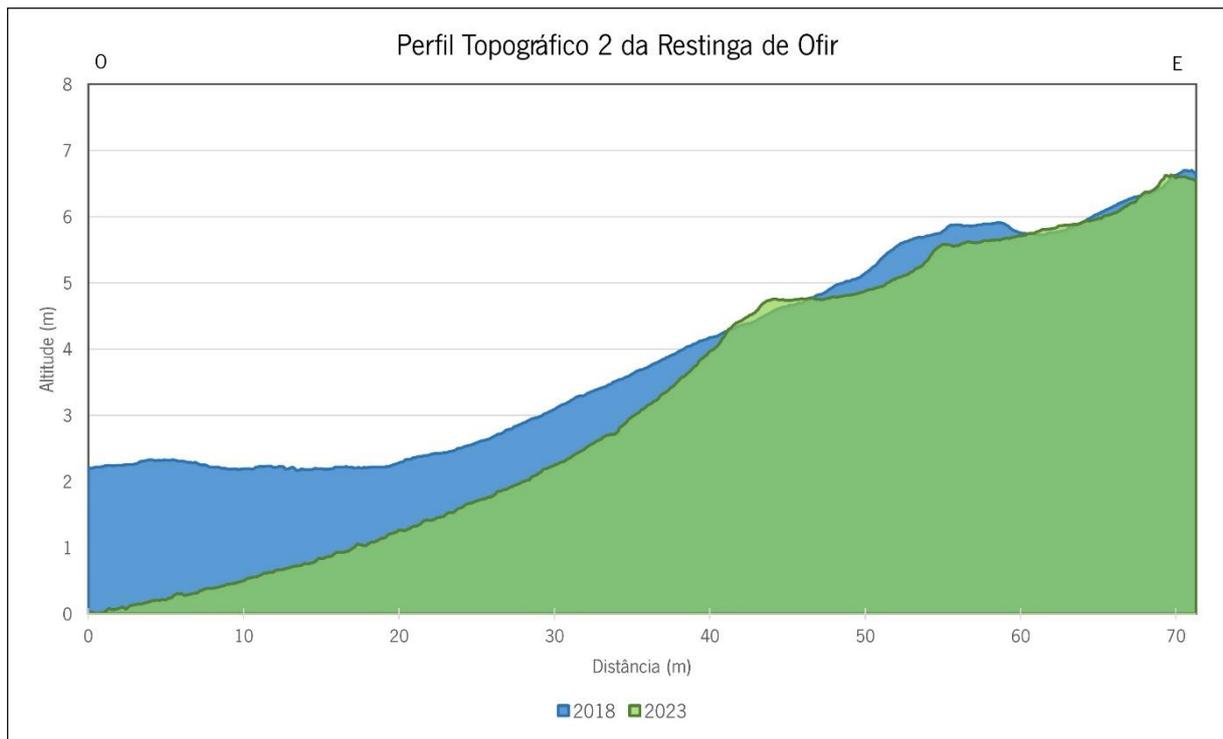


Figura IV - 5: Perfil Topográfico 2 da Restinga de Ofir.
 Fonte. Elaboração própria

Após a análise topográfica e altimétrica, é importante perceber as variações volumétricas da Restinga de Ofir de forma a se compreender a quantidade de sedimentos que foram removidos pela ação erosiva do mar desde 2018.

Na Figura IV - 6 está representada a distribuição espacial das variações volumétricas na área específica da Restinga de Ofir.

Analisando as diferenças volumétricas ocorridas entre 2018 e 2023, os dados apontam para uma perda volumétrica de 208 463,71 metros cúbicos numa área com apenas 99 329 m². Observando o mapa da Figura IV - 6, verifica-se que essas perdas ocorreram principalmente na extremidade norte da Restinga de Ofir e nas proximidades das dunas, que vieram a desaparecer. Neste segmento, o processo de deriva litoral é capaz de remover sedimentos das praias a um nível superior àquele que o ecossistema consegue fornecer, levando a que nesta zona ocorra o fenômeno de déficit sedimentar, reduzindo a quantidade de areias nas praias e aumentando, conseqüentemente, a vulnerabilidade do cordão dunar.



Figura IV - 6: Distribuição espacial da variação volumétrica na Restinga de Ofir entre 2018 e 2023.
 Fonte: Elaboração própria

Variação Volumétrica*			
ANO	2018	2023	DIFERENÇA
<u>Restinga de Ofir</u>	415 987,60 m ³	207 523,89 m ³	-208 463,71 m³

Tabela IV - 1: Variação volumétrica na Restinga de Ofir.

Fonte: Elaboração própria

*Volumetria medida a partir da base dos 0 metros de altitude.

Praia de Ofir

A segunda área específica corresponde à Praia de Ofir, com área de 83 627 m² e uma extensão de 1 116 metros, com uma altitude máxima de 15 metros em toda a sua extensão.

Relativamente à variação altimétrica, entre 2018 e 2023, graficamente representada na Figura IV - 7, a Praia de Ofir registou ganhos máximos de 3,25 metros e perdas máximas de altitude de 3 metros. As zonas que registaram os ganhos de altitude estão concentrados em dois locais – no cordão dunar e a norte do esporão de Ofir. A elevação de altitude, tal como na Restinga de Ofir, ocorreu devido à acumulação de sedimentos a norte do esporão de Ofir (Figura IV - 7B) e ao crescimento da vegetação existente entre 2018 e 2023. As perdas altimétricas ocorreram em setores onde se verifica o “abaixamento” das praias (Figura IV - 7A), tornando as praias mais suscetíveis a inundações marítimas em períodos de fortes tempestades, colocando em risco as construções de defesa costeira ali colocadas, e, conseqüentemente, aumentando a vulnerabilidade dos edifícios existentes.

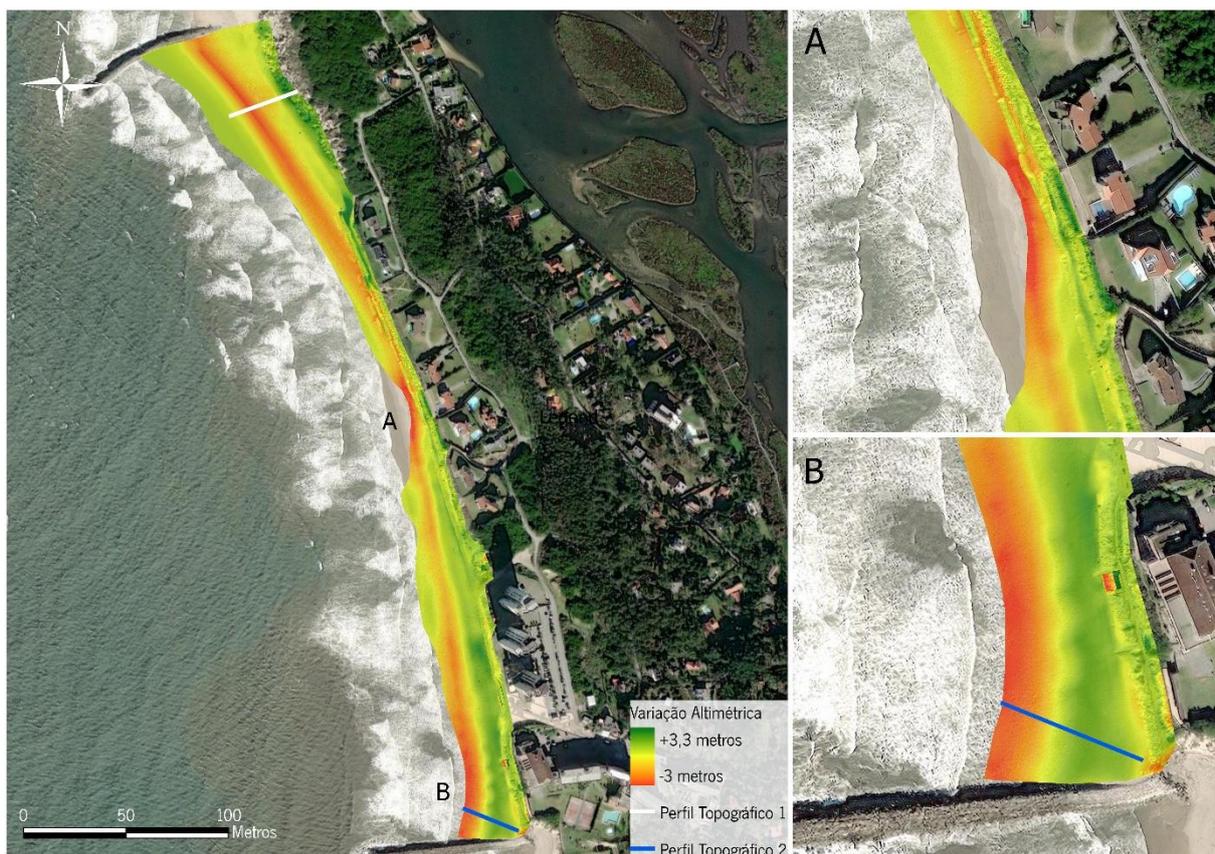


Figura IV - 7: Variação altimétrica da Praia de Ofir entre 2018 e 2023.

Fonte: Elaboração própria

Analisando o Perfil Topográfico 1 da Praia de Ofir (Figura IV - 8), é possível verificar que a perda de altitude na faixa da praia chegou a ser de 2,5 metros, contribuindo para o aumento da inclinação da zona de praia até aos primeiros 45 metros do perfil.

A partir dos 45 metros registaram-se ganhos de altitude devido à recuperação do cordão dunar comparativamente a 2018. Apesar da base da duna ter recuperado cerca de 10 metros, o topo da duna manteve-se praticamente na mesma posição desde 2018.

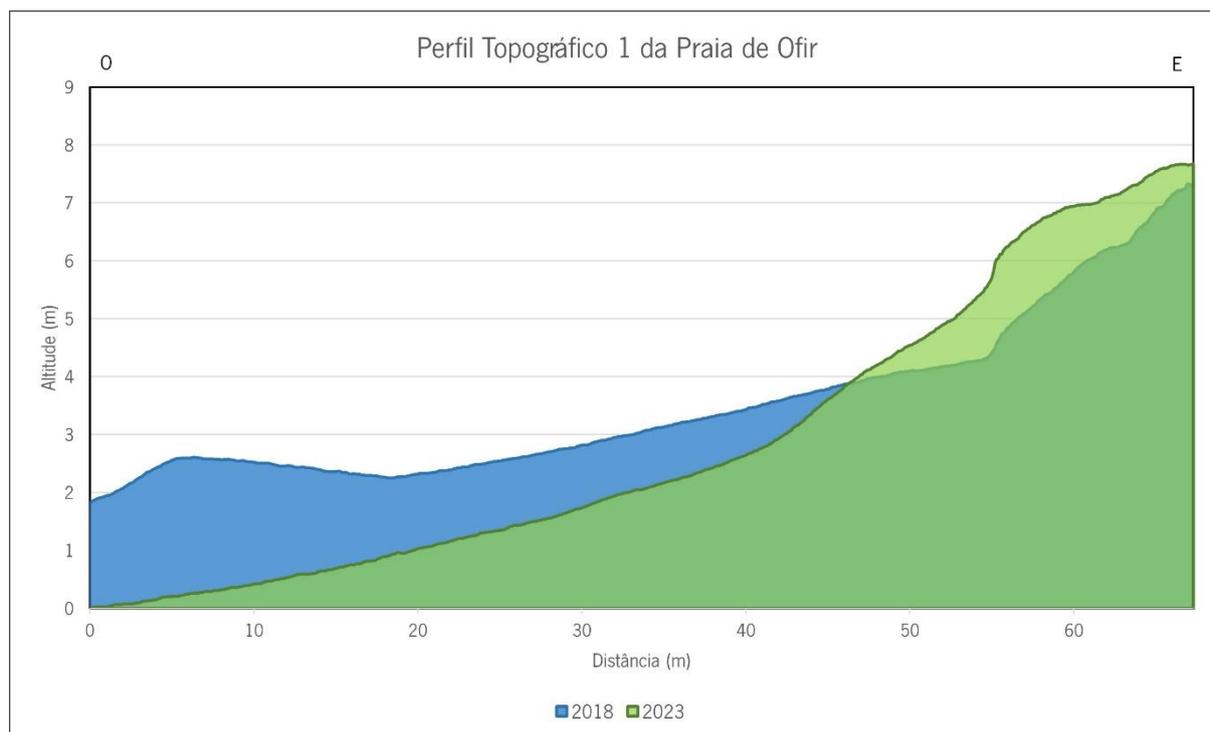


Figura IV - 8: Perfil Topográfico 1 da Praia de Ofir.

Fonte: Elaboração própria

Observando o Perfil Topográfico 2 da Praia de Ofir (Figura IV - 9), verifica-se que as zonas de praia mais perto da linha do mar sofreram uma diminuição de altitude relativamente a 2018, traduzindo-se no aumento da inclinação da praia nos primeiros 30 metros do perfil. A partir dos 30 metros, as alterações topográficas não foram muito significativas, tendo ocorrido um ganho de altitude de cerca de 50 centímetros devido à acreção de sedimentos causada pelo esporão.

Nos últimos 5 metros do perfil, verifica-se a perda de altitude de quase 1 metro comparativamente a 2018 devido à erosão acentuada que acontece na Praia da Bonança causada pelo esporão e que já tem removido sedimentos na base do próprio esporão atingindo já esta zona da Praia de Ofir, que é o principal acesso à Praia da Bonança.

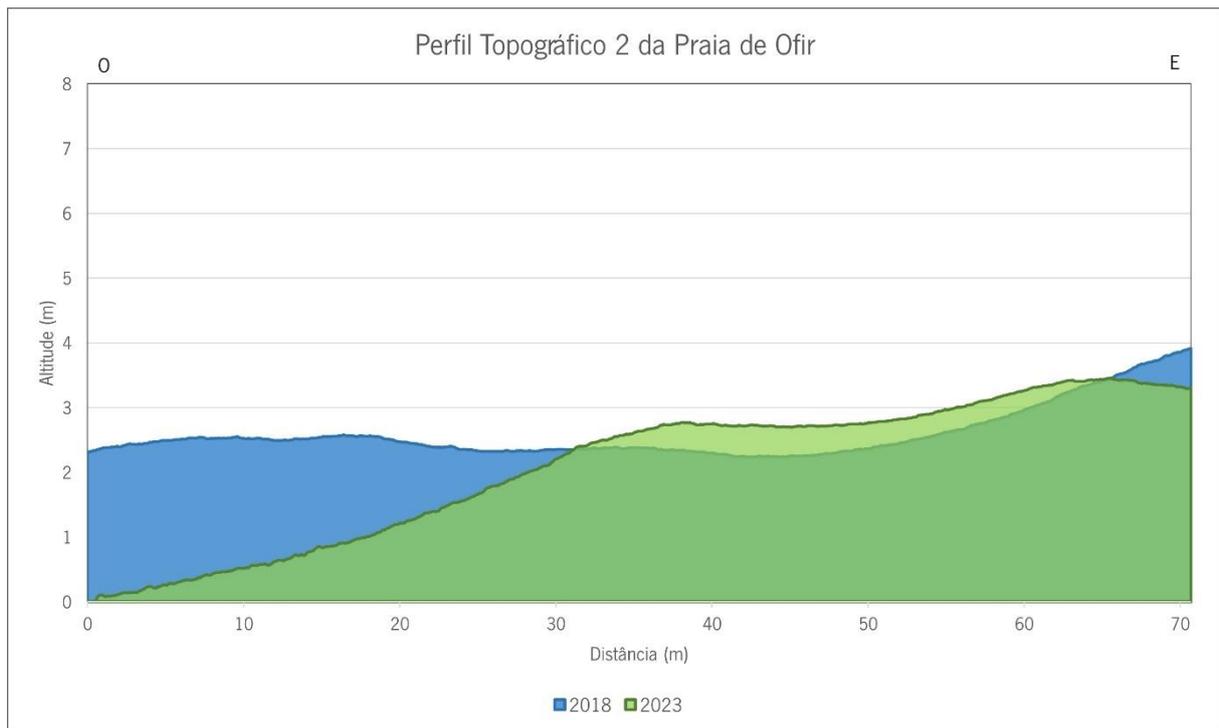


Figura IV - 9: Perfil Topográfico 2 da Praia de Ofir.
 Fonte: Elaboração própria

Através da Figura IV - 10 possível verificar a distribuição espacial das variações volumétricas na Praia de Ofir. Analisando as diferenças volumétricas ocorridas entre 2018 e 2023, os dados apontam para uma perda volumétrica de 72 612,14 metros cúbicos na Praia de Ofir. Observando o mapa da Figura IV - 10, verifica-se que essas perdas ocorreram em toda a área da Praia de Ofir, principalmente na extremidade norte da Restinga de Ofir e nas proximidades das dunas, que vieram a desaparecer. Neste segmento, o processo de deriva litoral é capaz de remover sedimentos das praias a um nível superior àquele que o ecossistema consegue fornecer, levando a que nesta zona ocorra o fenômeno de déficit sedimentar, reduzindo a quantidade de areias nas praias e aumentando, conseqüentemente, a vulnerabilidade do cordão dunar.



Figura IV - 10: Distribuição espacial da variação volumétrica na Praia de Ofir entre 2018 e 2023.
 Fonte: Elaboração própria

Varição Volumétrica*			
ANO	2018	2023	DIFERENÇA
<u>Praia de Ofir</u>	239 392,06 m³	161 779,92 m³	-72 612,14 m³

Tabela IV - 2: Diferenças volumétricas na Praia de Ofir.
 Fonte: Elaboração própria
 *Volumetria medida a partir da base dos 0 metros de altitude.

Praia da Bonança

A terceira área específica corresponde à Praia da Bonança, com uma área de 37 945 m² e uma extensão de 610 metros, com uma altitude máxima de 17 metros em toda a sua extensão.

Relativamente à variação altimétrica entre 2018 e 2023, a Praia da Bonança registou ganhos máximos de 4,75 metros e perdas máximas de altitude de 11,25 metros (Figura IV - 11). A zona que registou os principais ganhos de altitude está concentrada no cordão dunar a sul da obra de proteção costeira. Neste caso, a elevação de altitude ocorreu principalmente devido ao crescimento da vegetação existente entre 2018 e 2023. As perdas altimétricas ocorreram principalmente em setores onde se deu destruição dunar (Figura IV - 11A e Figura IV - 11B), colocando em risco as habitações e as infraestruturas localizadas no topo da duna. O setor mais prejudicado na Praia da Bonança corresponde à estrutura de proteção das habitações, tendo sido ultrapassada, em momentos de tempestades, destruindo 10 metros de duna no interior, criando um efeito de “ilha” na estrutura de proteção.

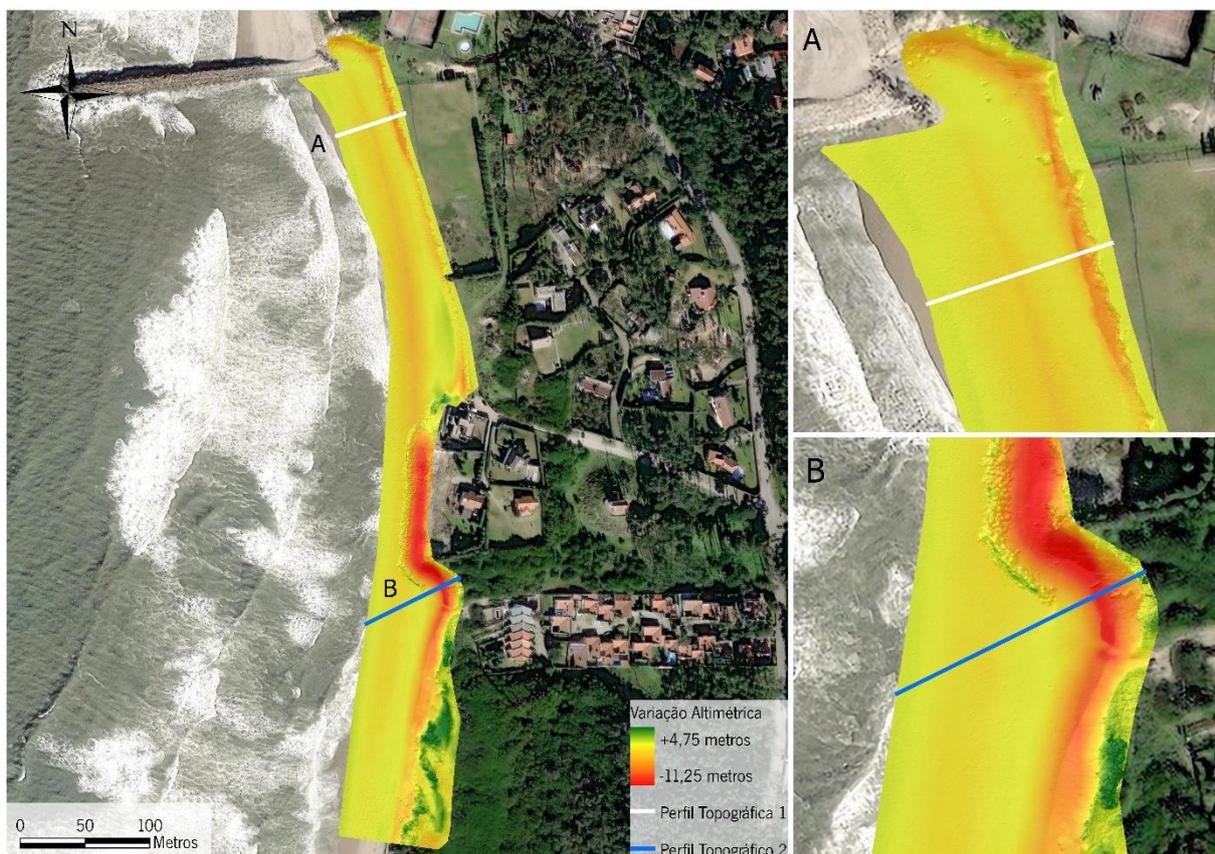


Figura IV - 11: Variação altimétrica na Praia da Bonança entre 2018 e 2023.
Fonte: Elaboração própria

Analisando o Perfil Topográfico 1 da Praia da Bonança (Figura IV - 12), verifica-se que morfologicamente esta praia, em 2018, era composta por “degraus”, com um declive de 10% na faixa mais próxima ao mar até aos 21 metros, sendo aplanada até à base da duna, nos 40 metros. Este tipo de morfologia do areal concede proteção ao cordão dunar, uma vez que a zona com maior inclinação tem a capacidade de dissipar a energia das ondas no momento da sua “rebentação”. Durante os 5 anos de análise, a morfologia da praia foi-se alterando, dando lugar a um perfil mais linear com a mesma inclinação desde a linha do mar até à base da duna. O topo da duna, que em 2018 estava na posição dos 40 metros do perfil, passou a estar posicionada nos 46 metros, representando uma migração de 6 metros do cordão dunar para o interior. Esta destruição do cordão dunar foi fortemente influenciada, entre outros fatores, pela remoção de sedimentos da praia, conduzindo à alteração da morfologia do areal acabando por expor a base da duna à energia das ondas.

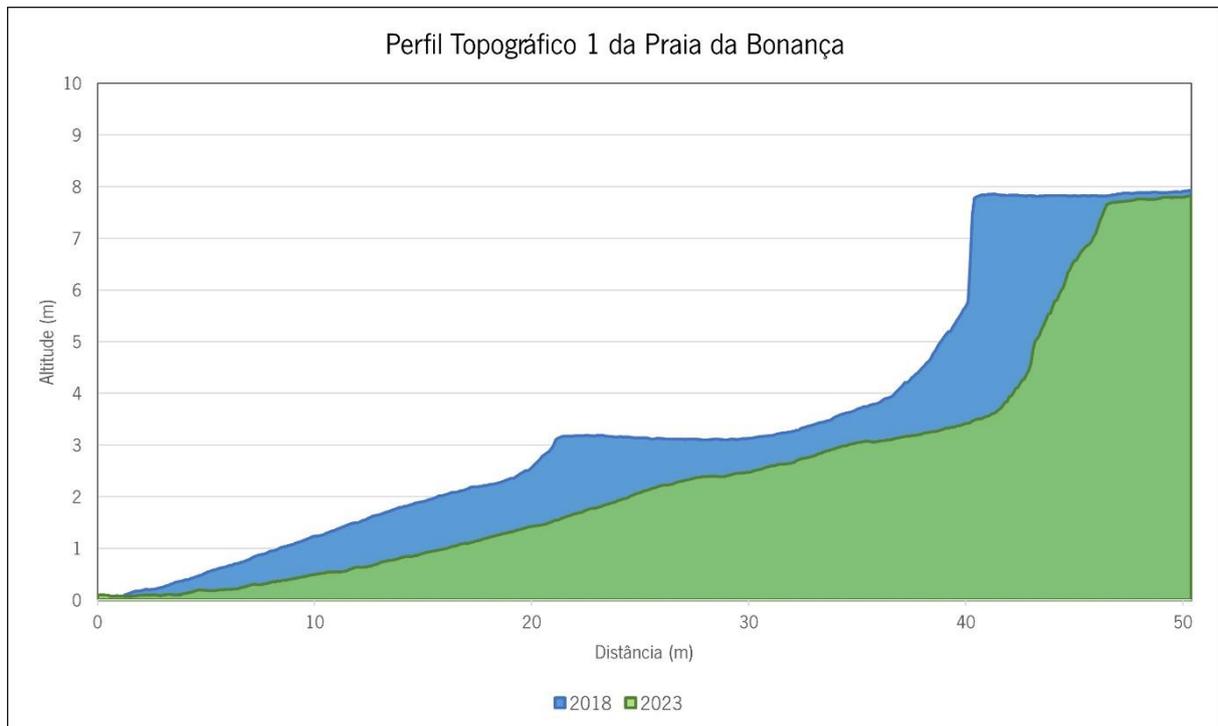


Figura IV - 12: Perfil Topográfico 1 da Praia da Bonança.
Fonte: Elaboração própria

Analisando o Perfil Topográfico 2 da Praia da Bonança (Figura IV - 13), verifica-se que, até aos 55 metros de distância, a morfologia da praia não sofreu alterações significativas relativamente a 2018. Por outro lado, dos 55 aos 77 metros ocorreu destruição da duna que em 2018 tinha uma altitude de aproximadamente 11 metros. O recuo de 22 metros da linha do topo de duna é bastante preocupante, considerando que se trata de uma zona com habitações e que já foi alvo de uma intervenção de defesa costeira pesada.

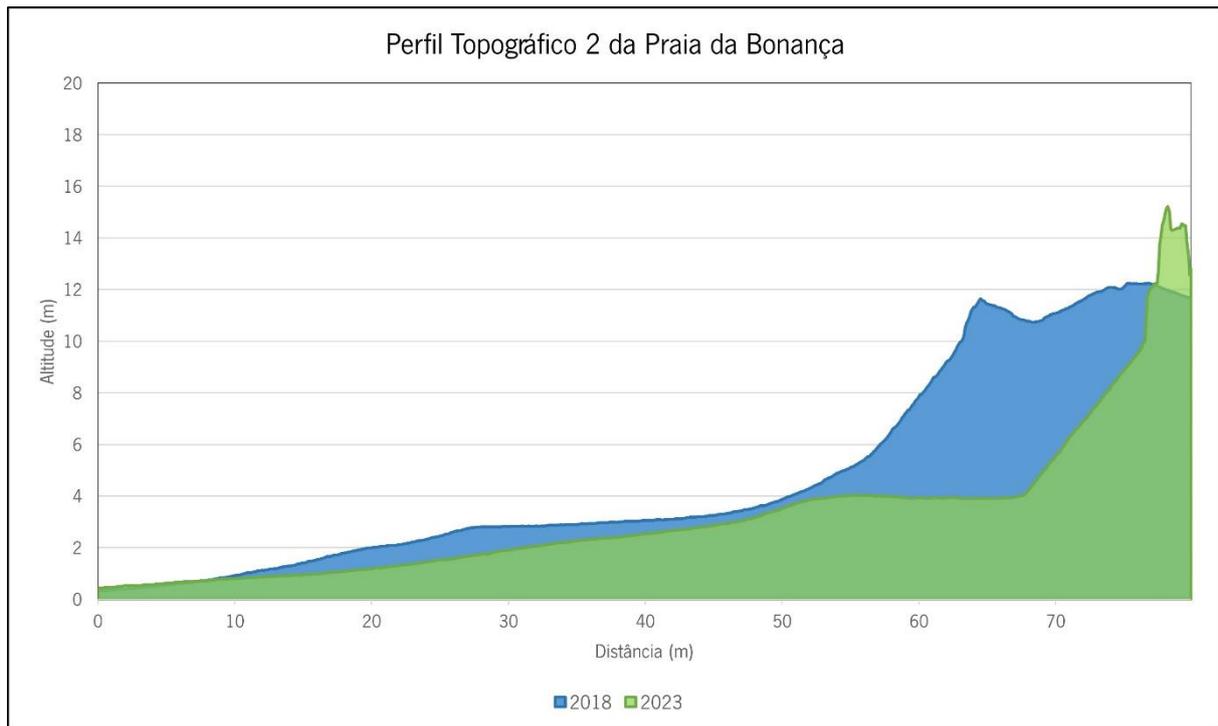


Figura IV - 13: Perfil Topográfico 2 da Praia da Bonança.
Fonte: Elaboração própria

No que concerne às alterações volumétricas, a Praia da Bonança em comparação com as duas áreas específicas em análise, foi a que perdeu mais volume sedimentar se se considerar que esta é a área mais pequena em estudo. Estes dados justificam-se com o facto de esta praia se localizar a sotamar do esporão de Ofir. Este esporão tem fortes impactos no processo da deriva litoral, sendo que tem um comprimento de 220 metros, sendo suficiente para quebrar o transporte de sedimentos por parte do oceano.



Figura IV - 14: Distribuição espacial das variações volumétricas na Praia da Bonança entre 2018 e 2023.
 Fonte: Elaboração própria

Variação Volumétrica*			
ANO	2018	2023	DIFERENÇA
<u>Praia da Bonança</u>	192 339,42 m ³	128 749,54 m ³	-63 589,88 m³

Tabela IV - 3: Diferenças volumétricas na Praia da Bonança.

Fonte: Elaboração própria

*Volumetria medida a partir da base dos 0 metros de altitude.

4.3. ANÁLISE 2 – *Digital Shoreline Analysis System*: Análise e Previsão das Alterações da Linha de Costa

4.3.1. Resultados e Análise

O software DSAS possibilita a análise dos resultados de duas formas, através de um relatório que contém as estatísticas gerais das taxas de erosão costeira, ou através da representação gráfica das *shapefiles* criadas com as respectivas tabelas de atributos.

Os resultados das três principais taxas de erosão estão representados na Tabela IV - 4, Tabela IV - 5 e Tabela IV - 6 e graficamente representados na Figura IV - 17.

<i>Shoreline Change Envelope</i>	
Distância Máxima	78,03 metros
Distância Mínima	2,01 metros
Distância Média	21,60 metros

Tabela IV - 4: Resultados da taxa *Shoreline Change Envelope*.

<i>Net Shoreline Movement</i>	
Distância Média	-10,89 metros
% do Segmento com Distância Negativa	75%
Distância Negativa Máxima	-78,03 metros
Distância Negativa Média	-18,32 metros
% do Segmento com Distância Positiva	25%
Distância Positiva Máxima	39,96 metros
Distância Positiva Média	11,40 metros

Tabela IV - 5: Resultados estatísticos da taxa *Net Shoreline Movement*.

<i>End Point Rate</i>	
Distância Média	-0,67 metros/ano
% do Segmento em Erosão	75%
Valor Máximo de Erosão	-4,7 metros/ano
% do Segmento em Erosão	25%
Valor Máximo de Acreção	2,43 metros/ano

Tabela IV - 6: Resultados estatísticos da taxa *End Point Rate*.

Tendo em conta que esta análise se baseou na linha relativa ao topo de duna, verifica-se a tendência de acreção de sedimentos nas praias a barlamar (norte) dos esporões e erosão da linha dunar a sotamar (sul) dos esporões.

Na extremidade norte da Restinga de Ofir, são visíveis os impactos da intensa dinâmica marítimo-fluvial na Foz do Rio Cávado, continuando a ser notória a enorme variação da linha de duna. Nesta zona, entre 2006 e 2023, a linha do cordão dunar migrou para o interior a uma taxa média de 4,73 metros por ano, resultando numa migração total de 78 metros.

No segmento a norte do esporão da Restinga de Ofir, é onde se verificam os maiores valores de acreção de sedimentos da área em análise, devido ao sentido Norte-Sul da deriva litoral, que implica a deposição de sedimentos a norte do esporão. Em alguns locais a acreção chegou a ocorrer a uma taxa de 2,4 metros por ano, traduzindo-se numa avanço da linha de duna em cerca de 40 metros desde 2006. A construção em arco deste esporão levou a que a erosão, que normalmente costuma ocorrer a sul dos esporões, fosse menos significativa, tendo ocorrido mesmo acreção na ordem de 1,5 metros por ano.

O segmento correspondente à Praia de Ofir é aquele que tem mais o cordão dunar mais artificializado, do qual se destacam as Torres de Ofir. Com a tendência de aumento das taxas de erosão costeira, foram implementadas algumas medidas de proteção às construções ali localizadas (Figura IV - 15). Algumas dessas medidas dizem respeito à colocação de geocilindros de areia e construção de muros e outros suportes dunares. Dessa forma, estas estruturas representam a linha dunar da Praia de Ofir, pelo que ao serem estruturas rígidas e pesadas, a sua posição não varia com muita frequência. A inalteração da posição dessas estruturas fazem com que os valores das taxas de erosão sejam praticamente nulos. Contudo, estas estruturas só são visíveis a partir das imagens de 2013, tendo sido, assim, calculadas as alterações anteriores a 2013.

O esporão de Ofir, que foi estrategicamente colocado de forma a proteger o hotel e as Torres de Ofir, acabou por ter o efeito contrário a sotamar do esporão, registando taxas de erosão costeira muito acentuadas, sendo a Praia da Bonança o setor mais afetado na área de estudo. Nesta praia, a migração das dunas para o interior chegou a ser de 37 metros, tendo obrigado à realocação do campo de futebol do hotel. Na praia da Bonança existe também artificialização do cordão dunar muito próxima da linha do mar, o que levou à construção de uma estrutura de proteção em pedra que tem acentuado as taxas de erosão nas dunas adjacentes a essa estrutura (Figura IV - 16).

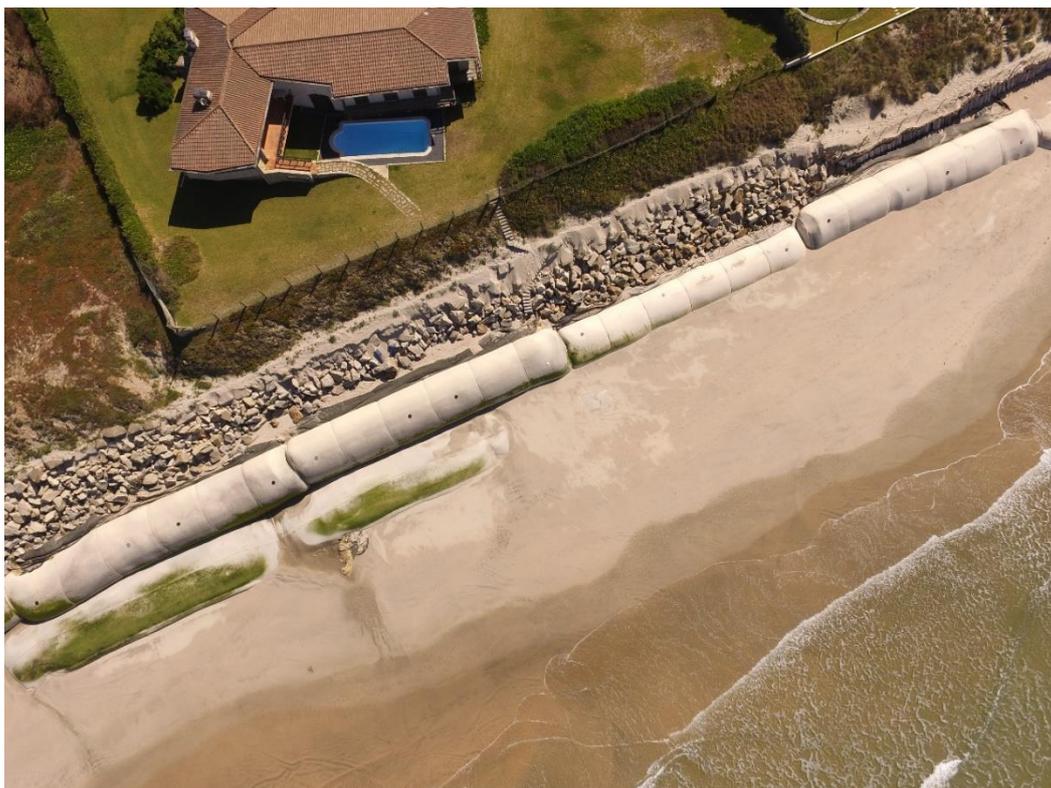


Figura IV - 15: Geocilindros e muros em pedra para proteção das habitações na Praia de Ofir.
Fonte: Fotografia obtida pelo autor



Figura IV - 16: Construção em pedra na Praia da Bonança para proteção de habitação.
Fonte: Fotografia obtida pelo autor

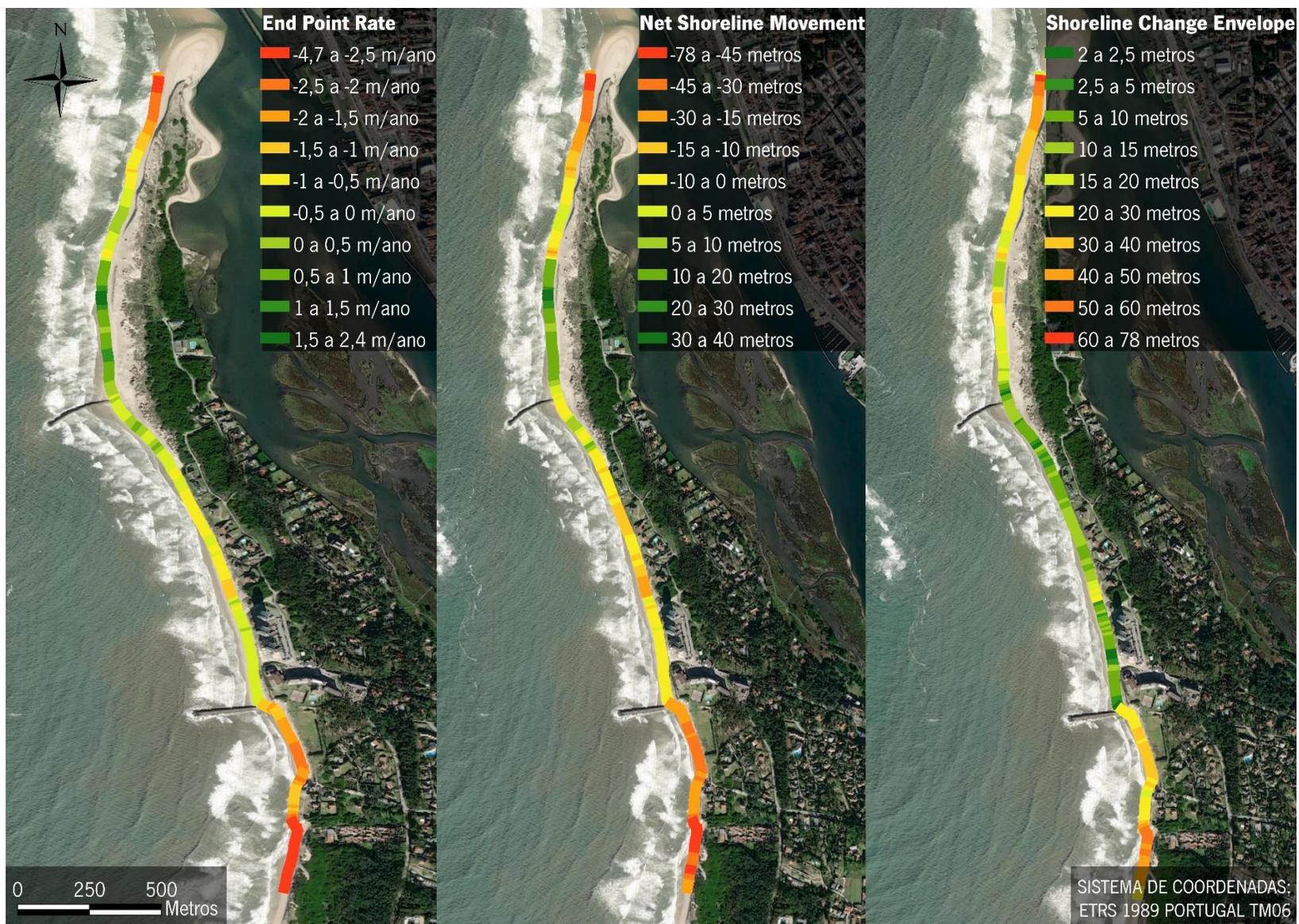


Figura IV - 17: Resultados de 3 taxas estatísticas (EPR, NSM e SCE) na área de estudo.
Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do DSAS.

O DSAS, tal como referido anteriormente, possui a capacidade de realizar a previsão da linha de costa para 10 anos e para 20 anos. Para este estudo a linha de costa considerada foi a linha do topo da duna, pelo que, da mesma forma, os resultados da previsão dizem respeito à posição do topo da duna. Na Figura IV - 18 está representada a previsão da posição da linha de costa (topo de duna), com ampliação a duas zonas – extremidade norte da Restinga de Ofir e na Praia da Bonança.

Para a Restinga de Ofir, prevê-se que a linha de duna retroceda 56 metros, com uma incerteza de 40,2 metros, na extremidade norte até 2043, traduzindo-se numa perda de 6800 m² de área dunar.

Para a Praia da Bonança, estima-se que o retrocesso da linha de duna seja de 43 metros, com uma incerteza de 10 metros, até 2043, destruindo uma área total de cerca de 13 500 m² de área, onde atualmente se encontram habitações e infraestruturas de apoio ao hotel ali instalado.

Contudo, é importante ressaltar que estas previsões são efetuadas apenas com base em modelos matemáticos e que presumem que as condições verificadas entre 2006 e 2023 irão ser as mesmas que irão acontecer até 2043, desconsiderando a aplicação de medidas de mitigação ou a atenuação ou o agravamento das condições naturais.



Figura IV - 18: Previsão da posição da linha do topo de duna para 2033 e 2043, com ampliação a duas zonas críticas.

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do DSAS.

CAPÍTULO V – SÍNTESE FINAL E RECOMENDAÇÕES

A monitorização das alterações costeiras e a sua dinâmica constitui um aspeto fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gestão integrada das zonas costeiras. A Resolução do Conselho de Ministros nº 82/2009, que aprova a Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira, além de outros Decretos-Lei e Portarias, afirmam que deve ser assegurada uma monitorização contínua através de metodologias inovadoras, uniformes e abrangentes que contribuam para o esboço de novas medidas de proteção e para a avaliação de medidas anteriormente instaladas.

A monitorização das zonas costeiras é um trabalho complexo, uma vez que se trata de ambientes muito dinâmicos, em que cada território tem diferentes especificações, existindo um conjunto de técnicas possíveis de aplicação.

Esta dissertação abordou a temática da monitorização costeira com recurso a drones e à aplicação de técnicas fotogramétricas e de análise espacial em ambiente SIG. O baixo custo das metodologias aplicadas assumiram particular relevância, tendo em conta a frágil economia do território de estudo.

Ao longo desta dissertação pretendeu-se utilizar as metodologias mais eficientes e aqueles que garantam a melhor relação entre três aspetos: qualidade, custo e facilidade de manipular e replicar. O trabalho elaborado é restrito a um setor costeiro desde a Restinga de Ofir até à Praia da Bonança, pelo que é importante referir que os resultados não podem ser generalizados a outras regiões costeiras. Contudo, é objetivo futuro deste trabalho comprovar a aplicabilidade das metodologias a outras regiões.

O surgimento dos drones como uma ferramenta de monitorização, seja ela costeira ou de qualquer outra natureza, aconteceu há bastante tempo, mas a sua utilização tem sido cada vez maior nos diferentes campos do conhecimento, mas que implicam monitorização e obtenção de dados com elevada precisão, como é o caso deste trabalho.

Os levantamentos aéreos foram o destaque do trabalho de campo. Contudo, foi notório o condicionamento dos dias de trabalho devido às condições atmosféricas, sendo esta a primeira adversidade encontrada neste trabalho. De forma a garantir uma maior cobertura da praia, pretendeu-se realizar os voos em momentos de maré baixa, o que também acabou por influenciar a escolha dos dias e horas dos levantamentos aéreos. Assim, a tentativa de conjugar estas condicionantes acabou por atrasar e dificultar a escolha dos dias de trabalho de campo.

Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, não foram apenas os drones que sofreram uma grande evolução das suas características. As técnicas fotogramétricas registaram avanços importantes, seja na facilidade e rapidez de execução, seja na qualidade final dos resultados gerados.

O software Agisoft Metashape mostrou-se uma ferramenta extremamente poderosa e de uma manipulação simples. A sua utilização neste trabalho foi primordial para atingir os resultados extremamente precisos.

O levantamento dos *Ground Control Points* através de GPS-GNSS tiveram um enorme impacto na melhoria da precisão dos ortofotomapa e dos Modelos Digitais de Superfície, aumentando a confiança dos resultados atingidos. O levantamento dos pontos de controlo requer mais tempo no trabalho de campo, principalmente se a área a monitorizar for muito grande. Os pontos devem ser levantados antes dos voos com drone, exigindo que os técnicos vão para o campo com mais antecedência se tencionarem fazer os voos com determinadas condições de maré, ou vento, entre outros. Uma das principais dificuldades encontradas neste trabalho relaciona-se precisamente com os pontos de controlo, principalmente naqueles colocados no areal, sendo que alguns deles foram destruídos pelos turistas curiosos, impossibilitando a sua utilização no processamento fotogramétrico.

Neste trabalho, a utilização de um Sistema de Informação Geográfica demonstrou-se eficaz e bastante útil. Os resultados obtidos a partir dos SIG permitiram criar uma análise robusta com elevado grau de confiança. Para demonstrar a diversidade de ferramentas dos Sistemas de Informação Geográfica foram elaborados vários tipos de análise espacial, em 3D, como a medição de altitudes, cálculo das variações de altitude, elaboração de perfis topográficos, medição volumétrica, cálculo de diferenças volumétricas, e em 2D, como o cálculo de taxas de erosão costeira, o que demonstra a diversidade de ferramentas possíveis de utilizar e a polivalência destes sistemas informáticos para qualquer temática.

Relativamente à discussão dos resultados e interpretação das análises é possível afirmar que, de forma geral, se trata de uma região extremamente suscetível à erosão costeira, com elevadas taxas de perda de sedimentos. Observou-se, de forma genérica, o movimento da linha do cordão dunar para o interior em quase toda a área de estudo. O recuo da linha de duna encontra-se fortemente relacionado com a diminuição da carga sedimentar, influenciando a topografia da praia, conduzindo ao “abaixamento” e aplanamento na faixa mais próxima à linha do mar, sendo as zonas que registam as maiores perdas dunares, concluindo, que a ausência de algum declive nas praias torna as dunas mais suscetíveis a inundações costeiras, principalmente em períodos de tempestade, e como consequência direta, mais suscetíveis a serem destruídas. Por outro lado, as zonas que registaram aumento de inclinação nas praias, são as que têm menores índices de recuo dunar, sendo notória a sua capacidade de dissipação da energia das ondas. Contudo, com a subida do nível do mar, a inclinação que as praias da área de estudo apresentam poderá não ser suficiente para conceder qualquer proteção ao cordão dunar.

Na Restinga de Ofir, entre 2006 e 2023, o topo de duna movimentou-se para o interior em 78 metros na extremidade norte, devido à intensa dinâmica marítimo-fluvial devido à Foz do Rio Cávado, mas também devido à presença de um pequeno esporão situado imediatamente a norte Restinga de Ofir e da Foz do Rio Cávado, que impede a deposição de sedimentos. Contudo, nas proximidades do esporão da Restinga de Ofir, a duna chegou a recuperar 40 metros desde 2006, o que se justifica pelo facto de este esporão ser o primeiro desde a Foz do Rio Cávado (se se considerar o sentido Norte-Sul, o mesmo da deriva litoral), sendo, por isso, o esporão que apresenta melhores condições para a deposição sedimentar.

Na Praia de Ofir, o movimento do cordão dunar não foi tão significativo em relação às outras áreas devido à intensa artificialização da linha de duna com obras pesadas de defesa costeira, tornando esta duna menos dinâmica no que concerne ao movimento dunar. Apesar disso, é notória a diminuição das altitudes nesta praia, fazendo com que seja facilmente inundada em momentos de maré alta, mesmo na época do Verão. Estes dados representam um potencial problema que pode vir a ocorrer, nomeadamente a destruição das bases das estruturas de proteção, por via de escavamento causado pelo movimento regressivo das ondas, e, por conseguinte, a destruição, por completo dessas estruturas. A sul da Praia de Ofir, verifica-se que a deposição de sedimentos causada pela existência do esporão continua a ocorrer, mas de forma menos significativa, sendo que entre 2018 e 2023, nessa área, houve diminuição altimétrica e perda de volume em sedimentos.

Apesar de estar a causar acreção a norte, o esporão de Ofir tem acentuado as taxas de erosão costeira na Praia da Bonança. A erosão nesta área é de tal forma, que a extremidade terrestre do esporão se encontra completamente deformada em relação a 2018 e ainda mais em relação ao início dos anos 90. Devido à sua localização a sul de um esporão com mais de 200 metros de comprimento, não ocorre praticamente nenhuma deposição de sedimentos nesta praia, ficando completamente inundada nos momentos em que os picos de maré alta são maiores, mesmo no Verão, onde os picos de maré alta costumam ser mais baixos. Estes níveis elevados de erosão levaram à construção de uma estrutura pesada para proteger algumas habitações. Contudo, esta estrutura também já se encontra em elevado risco de destruição

No total das três áreas de estudo, entre 2018 e 2023, ocorreu a perda de 343 000 m³ em sedimentos, segundo os dados obtidos, representando uma perda de 42 000 metros cúbicos por ano, em média. A reposição destes valores através da alimentação artificial representa um custo elevado de concretização, e não garante uma solução definitiva, porque se a tendência de défice sedimentar continuar ou se agravar ao longo dos anos a alimentação artificial das praias será insustentável a médio prazo.

No futuro, é recomendada a contínua monitorização da linha de costa com as mesmas metodologias, contudo recomendam-se também algumas alterações nos materiais utilizados. O drone utilizado neste trabalho demonstrou uma enorme capacidade de contribuir para os resultados pretendidos. No entanto, em áreas de maior dimensão este tipo de drones poderá não ser a melhor opção, substituindo-os por drones com mais autonomia, ou por drones de asa fixa. Estes drones, apesar de uma maior capacidade de cobertura aérea e maior autonomia, são mais caros, contrariando o ideal de monitorização de baixo custo. Outra recomendação seria a implementação da tecnologia LiDAR em projetos futuros, devido à sua elevada precisão e à sua capacidade de penetrar a vegetação ou até mesmo a superfície da água do mar, permitindo obter Modelos Digitais Terrestres de enorme qualidade ou até mesmo modelos batimétricos, permitindo quantificar e analisar a evolução do volume de sedimentos debaixo de água. Relativamente às obras de defesa costeira, concluiu-se neste trabalho que a sua implementação desmedida e mal planeada pode ter efeitos adversos aos desejados. Recomenda-se, por isso, a realização de estudo prévios à sua implementação, elaborados por técnicos das mais diversas áreas científicas, de forma a dar contributos robustos e de elevada confiança, mitigando os impactos nos ecossistemas costeiros. As medidas de proteção devem ser consideradas em prol do bem comum, e não apenas de um nicho da sociedade.

Os resultados obtidos neste trabalho são consistentes com os resultados de outros trabalhos científicos que adotaram as mesmas metodologias.

Na mesma área de estudo, a dissertação de mestrado de Pedro Gomes (P. Gomes, 2018) e o Programa COSMO da APA apresentam a mesma tendência de agravamento das taxas de erosão costeira nas Praias de Ofir e Bonança, em diferentes períodos temporais. A dissertação de Pedro Gomes demonstra as diferenças volumétricas, na ordem dos milhares de metros cúbicos, e também variações altimétricas nas Praias de Ofir e Bonança, entre 2016 e 2017. Sendo um período de análise mais curto, as diferenças registadas são menos expressivas do que as do presente trabalho. Contudo mantém-se a tendência de erosão/perda de sedimentos e acreção/ganho de sedimentos nos setores a sotamar e barlamar, respetivamente, dos esporões de proteção.

As dissertações de mestrado de Miguel Gomes (M. Gomes, 2018) e Pedro Peixoto (Peixoto, 2017), apesar de se focarem em setores costeiros de estudo diferentes, abrangem o município de Esposende e o PNLN. Estas dissertações, bem como o artigo científico de Gil Gonçalves (G. Gonçalves et al., 2016) e a

dissertação de mestrado de André Reis (Reis, 2018) também revelam dados que comprovam a ação contínua dos processos erosivos no litoral.

As metodologias utilizadas nos trabalhos anteriormente referidos envolveram a utilização de drones e a execução de levantamentos aéreos, comprovando a eficácia e o rigor dos resultados, mas também validando a utilização desta metodologia.

Os autores destes trabalhos recomendam também medidas de mitigação e adaptação à erosão costeira, apoiando também a contínua monitorização costeira através de metodologias de deteção remota.

No início desta dissertação foram esclarecidos os objetivos para este trabalho, e através das metodologias utilizadas, verifica-se que foram alcançados com elevada eficácia. Foram produzidos resultados extremamente fiáveis e rigorosos, podendo ser utilizados para futuros estudos que englobem esta área, ou até mesmo pelas entidades de governação locais. Os resultados obtidos neste trabalho, em conjunto com outros previamente elaborados permitem constituir uma boa base para a monitorização costeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artigos científicos e atas

- Al-Mutairi, N., Alsahli, M., El-Gammal, M., Ibrahim, M., & Samra, R. A. (2021). Environmental and economic impacts of rising sea levels: A case study in Kuwait's coastal zone. *Ocean & Coastal Management*, 205, 105572. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105572>
- Alesheikh, A. A., Ghorbanali, A., & Nouri, N. (2007). Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4(1), 61–66.
- Anfuso, G., & Martínez del Pozo, J. A. (2005). Towards management of coastal erosion problems and human structure impacts using GIS tools: case study in Ragusa Province, Southern Sicily, Italy. *Environmental Geology*, 48(4–5), 646–659. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1322-2>
- Archetti, R., & Zanuttigh, B. (2010). Integrated monitoring of the hydro-morphodynamics of a beach protected by low crested detached breakwaters. *Coastal Engineering*, 57(10), 879–891. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.05.002>
- Arora, S. D., & Chakraborty, A. (2021). Intellectual structure of consumer complaining behavior (CCB) research: A bibliometric analysis. *Journal of Business Research*, 122, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.08.043>
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 83–94. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3)
- Barnard, P. L., & Warrick, J. A. (2010). Dramatic beach and nearshore morphological changes due to extreme flooding at a wave-dominated river mouth. *Marine Geology*, 271(1–2), 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.01.018>
- Barry, P., & Coakley, R. (2013). Accuracy of UAV Photogrammetry Compared with Network RTK GPS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, 2.
- Berni, J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>
- Berni, J., Zarco-Tejada, P., Suarez, L., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2009). Remote Sensing of Vegetation from UAV Platforms Using Lightweight Multispectral and Thermal Imaging Sensors. *Environmental Science, Mathematics*.
- Bi, H. H. (2022). Four problems of the h-index for assessing the research productivity and impact of individual authors. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/s11192-022-04323-8>
- Bio, A., Bastos, L., Granja, H., Pinho, J. L. S., Gonçalves, J. A., 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. <https://doi.org/10.5894/rgci490>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>

- Brito, J. N., & Coelho, L. (2002). Fotogrametria Digital. In *Instituto Militar de Engenharia* (Vol. 1).
- Brock, J. C., & Purkis, S. J. (2009). The Emerging Role of Lidar Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management. *Journal of Coastal Research*, *10053*, 1–5. <https://doi.org/10.2112/SI53-001.1>
- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E. J., Gardel, A., & Dussouillez, P. (2016). Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, *261*, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.025>
- Carvalho, B. C., & Guerra, J. V. (2020). Coastal Vulnerability of Rio de Janeiro Shoreline (SE Brazil) due to Natural and Social Impacts. *Journal of Coastal Research*, *95*(sp1), 759. <https://doi.org/10.2112/SI95-148.1>
- Carvalho, de G. S., Granja, H. M., Loureiro, E., and Henriques, R. (2006). Late Pleistocene and Holocene environmental changes in the coastal zone of northwestern Portugal. *Journal of Quaternary Science*, *21*, 859–877. <https://doi.org/10.1002/jqs.1009>
- Charlier, R. H., Chaineux, M. C. P., & Morcos, S. (2005). Panorama of the History of Coastal Protection. *Journal of Coastal Research*, *211*, 79–111. <https://doi.org/10.2112/03561.1>
- Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, *38*(3), 697–710. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.022>
- Chou, T.-Y., Yeh, M. L., Chen, Y.-C., & Chen, Y.-H. (2010). Disaster Monitoring and Management by the Unmanned Aerial Vehicle Technology. *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria*, 137–142.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *92*, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Cowart, L., Walsh, J. P., & Corbett, D. R. (2010). Analyzing Estuarine Shoreline Change: A Case Study of Cedar Island, North Carolina. *Journal of Coastal Research*, *265*, 817–830. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00117.1>
- D. Moore, R. J. (2011). A Bio-Inspired Stereo Vision System for Guidance of Autonomous Aircraft. In *Advances in Theory and Applications of Stereo Vision*. InTech. <https://doi.org/10.5772/13184>
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B., & Houser, C. (2019). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108546126>
- Davidson, M., Van Koningsveld, M., de Kruijff, A., Rawson, J., Holman, R., Lamberti, A., Medina, R., Kroon, A., & Aarninkhof, S. (2007). The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering*, *54*(6–7), 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.007>
- Day, R. A. (1998). How to Write and Publish Scientific Papers. *Memórias Do Instituto Oswaldo Cruz*, *93*(3). <https://doi.org/10.1590/S0074-02761998000300029>
- de Schipper, M. A., Ludka, B. C., Raubenheimer, B., Luijendijk, A. P., & Schlacher, T. A. (2020). Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores. *Nature Reviews Earth & Environment*, *2*(1), 70–84. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00109-9>
- Dias, J. M. A. (1993). *Estudo de Avaliação da Situação Ambiental e Propostas de Salvaguarda para a Faixa Costeira*

Portuguesa (Relatório transformado em e-book).

- Dias, J. M. A. (2004). *A história da evolução do litoral português nos últimos vinte milénios.*
- Dias, J. M. A., Rodrigues, A., & Magalhães, F. (1997). Evolução da Linha de Costa, em Portugal, desde o Último Máximo Glaciário até à Actualidade: Síntese dos Conhecimentos. *Estudos Do Quaternário*, 1, 53–66.
- Didier, M. (1990). *Utilité et valeur de l'information géographique.* Economica, Paris.
- Dolan, R., Fenster, M. S., & Holme, S. J. (1991). Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723–744.
- Egels, Y., & Kasser, M. (2001). *Digital Photogrammetry.* CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203305959>
- Einsele, G. (2000). *Sedimentary Basins.* Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04029-4>
- Ferreira, Ó., & Matias, A. (2013). Portugal. In E. Pranzini & A. Williams (Eds.), *Coastal Erosion and Protection in Europe* (p. 19). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203128558>
- Fletcher, C., Rooney, M., Barbee, M., Lim, S. C., & Richmond, B. (2003). Mapping Shoreline Change Using Digital Orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 106–124.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Franceschini, N., Ruffier, F., & Serres, J. (2007). A Bio-Inspired Flying Robot Sheds Light on Insect Piloting Abilities. *Current Biology*, 17(4), 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.032>
- Gangapurwala, P. (2021). Methods of Stereophotogrammetry: A Review. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3866518>
- Gonçalves, G., Santos, S., Duarte, D., Duarte, J., & Santos, J. (2016). Utilização de Geotecnologias na Monitorização Topográfica da Erosão Costeira. *I Seminário Internacional UAV*, 68–81.
- Gonçalves, G., Santos, S., Duarte, D., & Gomes, J. (2019). Monitoring Local Shoreline Changes by Integrating UASs, Airborne LiDAR, Historical Images and Orthophotos. *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 126–134. <https://doi.org/10.5220/0007744101260134>
- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Granja, H. M. (1999). Evidence for Late Pleistocene and Holocene sea-level, neotectonic and climate control in the coastal zone of northwest Portugal. *Geologie en Mijnbouw*, 77, 233-245. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003634805106>
- Granja, H. M. (2002). Reconstituição Paleoambiental da Zona Costeira, a Norte da Laguna de Aveiro, desde a Idade Média até à Actualidade. In *O Litoral em Perspetiva Histórica (Séc. XVI a XVIII)* (pp. 93–109).
- Grenzdörffer, G., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The Photogrammetric Potential of Low-Cost UAVs in Forestry and Agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

Sciences. Vol. XXXVII. Part B1, 1207–1214.

- Grenzdörffer, G., Niemeyer, F., & Schmidt, F. (2012). Development of Four Vision Camera System for a Micro-UAV. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B1*, 369–374. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-369-2012>
- Grottoli, E., Biaisque, M., Rogers, D., Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. (2021). Structure-from-Motion-Derived Digital Surface Models from Historical Aerial Photographs: A New 3D Application for Coastal Dune Monitoring. *REMOTE SENSING, 13*(1). <https://doi.org/10.3390/rs13010095>
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., & Trittler, M. (2012). Performance Test on UAV-Based Photogrammetric Data Collection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/*, 7–12. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-7-2011>
- Haarbrink, R. B., & Koers, E. (2006). Helicopter UAV for Photogrammetry and Rapid Response. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Antwerp, Belgium*.
- Hapke, C., & Richmond, B. (2000). Monitoring Beach Morphology Changes Using Small-Format Aerial Photography and Digital Softcopy Photogrammetry. *Environmental Geosciences, 7*(1), 32–37. <https://doi.org/10.1046/j.1526-0984.2000.71001.x>
- Hartmann, W., Tilch, S., Eisenbeiss, H., & Schindler, K. (2012). Determination of the UAV Position by Automatic Processing of Thermal Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B6*, 111–116. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B6-111-2012>
- Hodgson, M. E., & Bresnahan, P. (2004). Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70*(3), 331–339. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.331>
- Holland, K. T., Vinzon, S. B., & Calliari, L. J. (2009). A field study of coastal dynamics on a muddy coast offshore of Cassino beach, Brazil. *Continental Shelf Research, 29*(3), 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.023>
- Hollmann, R., Merchant, C. J., Saunders, R., Downy, C., Buchwitz, M., Cazenave, A., Chuvieco, E., Defourny, P., de Leeuw, G., Forsberg, R., Holzer-Popp, T., Paul, F., Sandven, S., Sathyendranath, S., van Roozendaal, M., & Wagner, W. (2013). The ESA Climate Change Initiative: Satellite Data Records for Essential Climate Variables. *Bulletin of the American Meteorological Society, 94*(10), 1541–1552. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00254.1>
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports, 5*(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Ji, H., Luo, X. 3D scene reconstruction of landslide topography based on data fusion between laser point cloud and UAV image. *Environ Earth Sci* 78, 534 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8516-5>
- Jiang, S., Jiang, C., & Jiang, W. (2020). Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 167*, 230–251. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>
- Kale, S., & Acarli, D. (2019). Shoreline Change Monitoring in Atikhisar Reservoir by Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS). *Fresenius Environmental Bulletin, 28*(5), 4329–4339.

- Kapoor, K. K., Tamilmani, K., Rana, N. P., Patil, P., Dwivedi, Y. K., & Nerur, S. (2018). Advances in Social Media Research: Past, Present and Future. *Information Systems Frontiers*, 20(3), 531–558. <https://doi.org/10.1007/s10796-017-9810-y>
- Kohoutek, T. K., & Eisenbeiss, H. (2012). Processing of UAV based Range Imaging data to generate detailed elevation models of complex natural structures. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX(B1)*, 405–410. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000054313>
- Lakshmi, S. E., & Yarrakula, K. (2019). Review and critical analysis on digital elevation models. *Geofizika*, 35(2), 129–157. <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.7>
- Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., & Hanusch, T. (2007). Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1702–1712. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.008>
- Laycock, L. C., & Handerek, V. A. (2008). *Miniature imaging devices for airborne platforms* (D. A. Huckridge & R. R. Ebert (Eds.); p. 71130M). <https://doi.org/10.1117/12.799635>
- Linder, W. (2003). *Digital Photogrammetry*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06725-3>
- Madeira, S., Gonçalves, J., & Bastos, L. (2013). Accurate DTM generation in sand beaches using mobile mapping. *Journal of Coastal Conservation*, 17(3), 579–588. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0256-1>
- Makota, V., Sallema, R., & Mahika, C. (2004). Monitoring shoreline change using remote sensing and GIS: a case study of Kunduchi area, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science - Archive*, 3(1).
- Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., & Eisenbeiss, H. (2012). Unmanned Aerial Vehicle in Cadastral Applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/*, 57–62. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011>
- Martínez-de Dios, J. R., Merino, L., Caballero, F., Ollero, A., & Viegas, D. X. (2006). Experimental results of automatic fire detection and monitoring with UAVs. *Forest Ecology and Management*, 234, S232. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.259>
- Mello, C. C. de S., Salim, D. H. C., & Simões, G. F. (2022). UAV-based landfill operation monitoring: A year of volume and topographic measurements. *Waste Management*, 137, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.020>
- Melvin, A. M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J. E., Chinowsky, P., Espinet, X., Martinich, J., Baumann, M. S., Rennels, L., Bothner, A., Nicolsky, D. J., & Marchenko, S. S. (2017). Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(2). <https://doi.org/10.1073/pnas.1611056113>
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques (Online Edition)*.
- Mishra, D., Luo, Z., Jiang, S., Papadopoulos, T., & Dubey, R. (2017). A bibliographic study on big data: concepts, trends and challenges. *Business Process Management Journal*, 23(3), 555–573. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-10-2015-0149>

- Misra, A., & Balaji, R. (2015). A Study on the Shoreline Changes and LAND-use/ Land-cover along the South Gujarat Coastline. *Procedia Engineering*, 116, 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.311>
- Mitasova, H. (2004). Quantifying Rapid Changes in Coastal Topography using Modern Mapping Techniques and Geographic Information System. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.2113/10.1.1>
- Molina, P., Colomina, I., Vitoria, T., Silva, P. F., Skaloud, J., Kornus, W., Prades, R., & Aguilera, C. (2012). Searching Lost People with UAVs: The System and Results of The Close-Search Project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1, 441–446. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-441-2012>
- Muehe, D. (2011). Erosão Costeira - Tendência ou Eventos Extremos? O Litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 315–325. <https://doi.org/10.5894/rgci282>
- Nagai, M., Shibasaki, R., & Zhao, H. (2004). Development of Digital Surface Model and Feature Extraction by Integrating Laser Scanner and CCD Sensor with IMU. *Computer Science*, 5.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Niedermeier, A., Romaneessen, E., & Lehner, S. (2000). Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2270–2281. <https://doi.org/10.1109/36.868884>
- Nielsen, M. (2004). True orthophoto generation. *Environmental Science*.
- Niethammer, U., Rothmund, S., James, M. R., Travelletti, J., & Joswig, M. (2010). UAV-Based Remote Sensing of Landslides. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 496–501.
- Oczipka, M., Bemann, J., Piezonka, H., Munkabayar, J., Ahrens, B., Achtelik, M., & Lehmann, F. (2009). *Small drones for geo-archaeology in the steppe: locating and documenting the archaeological heritage of the Orkhon Valley in Mongolia* (U. Michel & D. L. Civco (Eds.); p. 747806). <https://doi.org/10.1117/12.830404>
- Papakonstantinou, A., Doukari, M., & Topouzelis, K. (2017). Coastline Change Detection Using Unmanned Aerial Vehicles and Image Processing Techniques. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(9), 5564–5571.
- Paskoff, R. (2001). L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers. Le mythe et la réalité. *Géomorphologie*, 7(4), 302–303. <http://id.erudit.org/iderudit/008303ar>
- Petrie, G. (2011). Airborne topographic laser scanners. *GEOInformatics*, 14(1), 34–44.
- Pettorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Mùcher, S., Dawson, T. P., Fernandez, M., Lucas, R., Schaepman, M. E., Wang, T., O'Connor, B., Jongman, R. H. G., Kempeneers, P., Sonnenschein, R., Leidner, A. K., Böhm, M., He, K. S., Nagendra, H., Dubois, G., Fatoyinbo, T., ... Geller, G. N. (2016). Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(3), 122–131. <https://doi.org/10.1002/rse2.15>
- Rau, J.-Y., Chen, N.-Y., & Chen, L.-C. (2002). True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(6), 581–588.

- Resop, J. P., Lehmann, L., & Hession, W. C. (2019). Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: Comparison with Traditional Aerial Lidar. *Drones*, 3(2), 35. <https://doi.org/10.3390/drones3020035>
- Restas, A. (2016). Drone Applications for Preventing and Responding HAZMAT Disaster. *World Journal of Engineering and Technology*, 4(3C).
- Rinaudo, F., Chiabrande, F., Lingua, A., & Spanò, A. (2012). Archaeological Site Monitoring: UAV Photogrammetry can be an Answer. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 583–588.
- Rocha, C. P., Araújo, T. C. M., & Mendonça, F. J. B. (2009). Aplicação de metodologia alternativa para localizar e monitorar linhas de costa usando técnicas de posicionamento pelo GNSS: Um estudo de caso na praia de Sauaçui, Nordeste do Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 9(1), 93–108. <https://doi.org/10.5894/rgci151>
- Saito, K., Spence, R. J. S., Going, C., & Markus, M. (2004). Using High-Resolution Satellite Images for Post-Earthquake Building Damage Assessment: A Study following the 26 January 2001 Gujarat Earthquake. *Earthquake Spectra*, 20(1), 145–169. <https://doi.org/10.1193/1.1650865>
- Salghuna, N. N., & Bharathvaj, S. A. (2015). Shoreline Change Analysis for Northern Part of the Coromandel Coast. *Aquatic Procedia*, 4, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.043>
- San, B. T., & Suzen, M. L. (2005). Digital elevation model (DEM) generation and accuracy assessment from ASTER stereo data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(22), 5013–5027. <https://doi.org/10.1080/01431160500177620>
- Sanna, A., & Pralio, B. (2005). Simulation and Control of Mini UAV 's. *5th WSEAS Int. Conf. on Simulation, Modeling and Optimization*, 129–135.
- Santos Ferreira, A., & Santos, C. (2014). Molhe Norte da Barra do Douro. *Ingenium II*.
- Santos, J. V. C., & Lima, M. S. D. (2016). Análise Matemática da Origem, Formação e Classificação dos Ventos: uma Aplicação dos Operadores Diferenciais. *Revista Ciência (In) Cena*, (2), 83-92.
- Satta, A., Puddu, M., Venturini, S., & Giupponi, C. (2017). Assessment of coastal risks to climate change related impacts at the regional scale: The case of the Mediterranean region. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.06.018>
- Schafroth, D., Bouabdallah, S., Bermes, C., & Siegwart, R. (2009). From the Test Benches to the First Prototype of the muFly Micro Helicopter. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 54(1–3), 245–260. <https://doi.org/10.1007/s10846-008-9264-z>
- Schmidt, D., & Kühn, F. (2007). Aerial Photography. In *Environmental Geology* (pp. 23–71). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_3
- Semeoshenkova, V., & Newton, A. (2015). Overview of erosion and beach quality issues in three Southern European countries: Portugal, Spain and Italy. *Ocean & Coastal Management*, 118, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.013>
- Sharr, M. B. (2019). Utilizing Small Unmanned Aerial Systems (sUAS) with Structure from Motion (SfM) for Shoreline Verification. *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, OCEAN 2018*.

<https://doi.org/10.1109/OCEANS.2018.8604891>

- Short, A. D., & Trembanis, A. C. (2004). Decadal Scale Patterns in Beach Oscillation and Rotation Narrabeen Beach, Australia—Time Series, PCA and Wavelet Analysis. *Journal of Coastal Research*, 20(2), 523–532. [https://doi.org/https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)020\[0523:DSPIBO\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)020[0523:DSPIBO]2.0.CO;2)
- Smith, J. G., Dehn, J., Hoblitt, R. P., LaHusen, R. G., Lowenstern, J. B., Moran, S. C., McClelland, L., McGee, K. A., Nathenson, M., Okubo, P. G., Pallister, J. S., Poland, M. P., Power, J. A., Schneider, D. J., & Sisson, T. W. (2009). Volcano monitoring. In *Geological Monitoring*. Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2009.monitoring\(12\)](https://doi.org/10.1130/2009.monitoring(12))
- Souza, C. R. de G., & Luna, G. da C. (2010). Variação da linha de costa e balanço sedimentar de longo período em praias sob risco muito alto de erosão do município de Caraguatatuba (Litoral Norte de São Paulo, Brasil). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 10(2), 179–199. <https://doi.org/10.5894/rgci176>
- Su, J., & Bork, E. (2006). Influence of Vegetation, Slope, and Lidar Sampling Angle on DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(11), 1265–1274. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.11.1265>
- Tan, Z., Di, L., Zhang, M., Guo, L., & Gao, M. (2019). An Enhanced Deep Convolutional Model for Spatiotemporal Image Fusion. *Remote Sensing*, 11(24), 2898. <https://doi.org/10.3390/rs11242898>
- Thevara, D. J., & Vasanth Kumar, C. (2018). Application of photogrammetry to automated finishing operations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402, 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012025>
- Tkáč, M., & Mésároš, P. (2019). Utilizing drone technology in the civil engineering. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 14(1), 27–37. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2019-0003>
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., & Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección*, 55, 1. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>
- Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.011>
- Uddin, A., Singh, V. K., Pinto, D., & Olmos, I. (2015). Scientometric mapping of computer science research in Mexico. *Scientometrics*, 105(1), 97–114. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1654-y>
- Valle, A. (2014). Perda de Território por Ação do Mar: Uma Questão Nacional. *Ingenium II*.
- Vallet, J., Panissod, F., Strecha, C., & Tracol, M. (2012). Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet UAV. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/, 253–258. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-253-2011>
- Verhoeven, G. J. J. (2009). Providing an archaeological bird's-eye view - an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. *Archaeological Prospection*, 16(4), 233–249. <https://doi.org/10.1002/arp.354>
- Viana, C. D. (2021). *Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057>
- Vierling, L., Fersdahl, M., Chen, X., Li, Z., & Zimmerman, P. (2006). The Short Wave Aerostat-Mounted Imager

- (SWAMI): A novel platform for acquiring remotely sensed data from a tethered balloon. *Remote Sensing of Environment*, 103(3), 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.021>
- Wang, X., Zhang, W., Yin, J., Wang, J., Ge, J., Wu, J., Luo, W., & Lam, N. S. N. (2021). Assessment of coastal erosion vulnerability and socio-economic impact along the Yangtze River Delta. *Ocean & Coastal Management*, 215, 105953. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105953>
- Warner, K., Zommers, Z., Wreford, A., Hurlbert, M., Viner, D., Scantlan, J., Halsey, K., Halsey, K., & Tamang, C. (2019). Characteristics of Transformational Adaptation in Climate-Land-Society Interactions. *Sustainability*, 11(2), 356. <https://doi.org/10.3390/su11020356>
- Wen-Qin Wang, Qicong Peng, & Jingye Cai. (2009). Waveform-Diversity-Based Millimeter-Wave UAV SAR Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 691–700. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2008720>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Zhang, C. (2008). An UAV-Based Photogrammetric Mapping System for Road Condition Assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 627–632.

Livros, dissertações e teses

- (AFNOR), A. F. de N. (1989). *Dicionário de Informática*.
- Alves, A. M. C. (1996). *Causas e processos da dinâmica sedimentar na evolução actual do litoral do Alto Minho*. Universidade do Minho.
- Andrade, C. (1990). *O Ambiente de Barreira da Ria Formosa*. Universidade de Lisboa.
- Bolstad, P. (2007). *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Chang, K. (2018). *Introduction to Geographic Information Systems* (9th ed.). McGraw Hill.
- DeMers, M. N. (2008). *Fundamentals of Geographic Information Systems* (4th ed.). WILEY.
- Denègre, J., & Salgé, F. (1996). *Les systèmes d'information géographique*. Presses Universitaires de France.
- Granja, H. M. (1990). *Repensar a geodinâmica da zona costeira. O passado e o presente. Que futuro?* Universidade do Minho.
- Gomes, M. (2018). *Monitorização e modelação da morfodinâmica costeira através de veículos aéreos não tripulados (VANT): Casos de estudo nas praias de Belinho, Fieiro Alto e Cepães*. Universidade do Minho.
- Gomes, P. (2018). *Monitorização e modelação da morfodinâmica costeira através de veículos aéreos não tripulados (VANT) – O caso das praias de Ofir e Bonança (Esposende, noroeste de Portugal)*. Universidade do Minho.
- Henriques, R. (2006). *Monitorização da zona costeira tendo em conta a sua vulnerabilidade - Aplicação à zona costeira noroeste de Portugal*. Universidade do Minho.
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*. CRC Press.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th ed.). WILEY.
- Loureiro, E. J. (2006). *Indicadores Geomorfológicos e Sedimentológicos na Avaliação da Tendência Evolutiva da Zona Costeira (Aplicação ao concelho de Esposende)*. Universidade do Minho.
- Maia, J. P. R. F. (2021). *Evolução recente da dinâmica costeira no setor Afife-Arda (Viana do Castelo)*. Universidade do Minho.
- Mendes, J. F. G. (1994). *Sistemas de Informação para Planeamento*. Universidade do Minho.
- Nunes, A. F. P. (2017). *A avaliação da sustentabilidade das infraestruturas de defesa costeira com recurso à utilização de veículos aéreos não tripulados e modelação 3D*. Universidade Nova de Lisboa.
- Peixoto, P. (2017). *Monitorização e modelação da morfodinâmica costeira através de veículos aéreos não tripulados (VANTs): Casos de estudo em zonas costeiras de Portugal*. Universidade do Minho.
- Puebla, J. G., & Gould, M. (1994). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Sintesis.
- Reis, A. (2018). *Extração de modelos digitais de superfície a partir de imagens aéreas para monitorização e estudo de riscos costeiros*. Universidade do Minho.

Teixeira, S. (1990). *Dinâmica das praias da península de Setúbal (Portugal)*. Universidade de Lisboa.

Vidal, A. M. F. (2013). *Extração e avaliação de geoinformação pelo uso de imagens adquiridas por veículos aéreos não tripulados*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Zeiler, M. (1999). *Modelling Our World*.

Sítios de Internet

<<https://cosmo.apambiente.pt/>>, APA (consultado em 20/03/2023)

<<https://www.gim-international.com/content/article/improving-heritage-documentation>>, GIM International (consultado em 22/03/2023)

<<https://blog.droneng.com.br/buracos-no-ortofotomosaico-como-evitar/>> , DronEng (consultado 29/03/2023)

<<https://www.esri-portugal.pt/pt-pt/o-que-sao-os-sig/overview> >, esri Portugal (consultado em 21/04/2023)

<<https://www.nps.gov/im/secn/shoreline-change.htm> >, National Park Service (consultado em 18/03/2023)

<<https://uvs-international.org/>>, UVS International (consultado em 21/03/2023)

<<https://www.propelleraero.com/blog/how-to-optimize-your-ground-control-point-placement-for-drone-surveying/>>, Propeller (consultado em 10/04/2023)

Outros

- Abecassis, F. (1997). Caracterização geral geomorfológica e aluvionar da costa continental portuguesa. *Associação Eurocast-Portugal*, 9–24.
- ANPC. (2010). *Riscos Costeiros - Estratégias de prevenção, mitigação e proteção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território*.
- Mantellato, P. M. B. (2012). *As Influências da Lua na Terra e o Fenômeno das Marés*. Universidade Federal de São Carlos.
- Matos, J. (2007). *Modelos Digitais de Terreno*. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura.
- O'Neill, C. R. J. (1985). *A Guide to Coastal Erosion Processes*.
- Santos, F. D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L., & Taborda, R. (2014). *Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança*.
- Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry. *The Ohio State University, Columbus*.
- Teixeira, C., Medeiros, A. C., Alves, C. A. M., & Moreira, M. M. (1969). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Notícia explicativa da folha 5C - Barcelos*.

ANEXOS

ANEXO I: Coordenadas e precisão dos *Ground Control Points*.

Ground Control Points					
ID	Longitude (X)	Latitude (Y)	Altitude (Z)	HRMS*	VRMS**
1	-8,787956922	41,51822136	1,540904762	0,010	0,013
2	-8,787917009	41,51786198	0,901238095	0,020	0,029
3	-8,787718914	41,51704713	0,922714286	0,012	0,016
4	-8,786378095	41,51507898	0,836904762	0,011	0,015
5	-8,786219077	41,51470956	0,897571429	0,011	0,015
6	-8,78604765	41,51427193	0,767714286	0,010	0,014
7	-8,785883594	41,51375755	1,27352381	0,014	0,017
8	-8,790209585	41,53099426	5,600428571	0,014	0,022
9	-8,790409354	41,53091004	8,523952381	0,014	0,022
10	-8,790478063	41,53054491	10,75438095	0,014	0,021
11	-8,790120968	41,53334286	7,463333333	0,013	0,020
12	-8,790274899	41,53039847	13,78947619	0,011	0,017
13	-8,790131183	41,52773982	4,990190476	0,010	0,015
14	-8,789692205	41,5265069	4,202428571	0,010	0,016
15	-8,788595285	41,52450814	4,789428571	0,019	0,038
16	-8,789390661	41,52416654	5,303761905	0,009	0,014
17	-8,78908053	41,52322632	5,770952381	0,011	0,017
18	-8,788168175	41,52194333	5,482714286	0,013	0,020
19	-8,787559064	41,52097242	4,537952381	0,014	0,021
20	-8,787072505	41,51968748	5,218714286	0,012	0,020
21	-8,786631048	41,51910903	5,68847619	0,011	0,017
Precisão Média				0,013	0,020

* HRMS (Horizontal Root Mean Square): Precisão horizontal, em metros.

** VRMS (Vertical Root Mean Square): Precisão vertical, em metros.

ANEXO II: Distribuição espacial dos *Ground Control Points*.



ANEXO III: Parâmetros do processamento fotogramétrico

General

Cameras	1875
Aligned cameras	1847
Markers	23

Shapes

Polygons	1
Coordinate system	ETRS89 (EPSG::4258)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	1 252 863 of 1 350 372
RMS reprojection error	0.23546 (0.975667 pix)
Max reprojection error	4.07451 (40.365 pix)
Mean key point size	4.31759 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.48401

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	No
Key point limit	40 000
Tie point limit	4 000
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	55 minutes 16 seconds
Alignment time	13 minutes 26 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	2 minutes 36 seconds

Depth maps

Count	1842
-------	------

Reconstruction parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	3 hours 23 minutes

Dense Point Cloud

Points	361 941 988
Point colors	3 bands, uint8

Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	3 hours 23 minutes
Dense cloud generation time	2 hours 50 minutes
DEM	
Size	27 053 x 79 961
Coordinate system	ETRS89 (EPSG::4258)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	7 minutes 43 seconds
Orthomosaic	
Size	30 333 x 124 901
Coordinate system	ETRS89 (EPSG::4258)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	29 minutes 16 seconds
Software	
Version	1.5.1 build 7618
Platform	Windows 64

ANEXO IV: Localização e sobreposição das fotografias aéreas.

