

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Dinâmica Sedimentar da Baía de Porto Santo

Joana Sofia Pereira de Miranda

Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Ana Maria Almeida Nobre Silva
Investigadora Maria Teresa Drago Pereira

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o resultado de todo o trabalho desenvolvido, com altos e baixos, ao longo do ano que passou. Não teria conseguido sem a preciosa ajuda das pessoas que me rodearam e me apoiaram para que concluísse mais esta etapa da minha vida académica e pessoal.

Primeiramente, à minha orientadora, Professora Doutora Ana Nobre Silva, por todo o auxílio, disponibilidade e profissionalismo. Por todos os ensinamentos transmitidos e pela motivação constante, sem a sua ajuda não teria sido possível concretizar este trabalho. À minha coorientadora, Investigadora Teresa Drago, pela motivação e auxílio nas fases preponderantes do trabalho.

Ao Professor Doutor Rui Taborda e ao Professor Doutor César Andrade, pela ajuda, prontidão, disponibilidade e partilha de ensinamentos ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e ao Departamento de Geologia, por tornar estes últimos seis anos extraordinários e pela cedência de laboratórios e materiais necessários para a realização da análise granulométrica.

Ao IPMA e ao Projeto LIFE por me terem dado a oportunidade de explorar, aprender e desenvolver este trabalho.

Aos meus melhores amigos, Marta, Diana, Gonçalo e Diogo, por serem uma âncora durante todo o percurso sempre que pensei em desistir. À Joana, que apesar da falta de tempo para estarmos juntas presencialmente, sempre foi uma força fundamental à distância de uma mensagem.

Ao Teorias, Faleiro, Joana e Dory, por todas as memórias que partilhámos ao longo da nossa vida académica, por toda a ajuda, motivação e companhia durante a pandemia e, acima de tudo pela nossa amizade ao longo dos momentos bons e menos bons.

Aos meus padrinhos, Mic e Bruna, pela presença em todos os momentos mais importantes e desafiantes da minha vida académica.

Aos meus afilhados, Beatriz, Laura e Luís, por me ensinarem a ser paciente e por estarem sempre presentes, cada um à sua maneira.

Às minhas amigas do futebol, ao Vrum Vrum e às tóxicas, que sempre me apoiaram nos dias menos bons e não me deixaram desistir. Especialmente, à Miguel e à Zim, que apesar de me meterem a jogar Fortnite, sempre me apoiaram. À Mariana, que me acompanhou durante a maior parte do meu percurso académico e sempre me motivou a continuar.

Aos meus amigos da faculdade, Tatiana, Mariana, Jéssica e Diogo, os meus primeiros amigos que a faculdade de ciências me deu, ao longo de todos estes anos sempre me apoiaram, estiveram presentes e nunca desistiram de mim.

À Laura, Formiga e Maria Inês, por todos os jogos disputados no estádio universitário, fins de tarde no minicampus e mais importante, pelo apoio ao longo destes anos todos.

À minha família, mãe, pai, irmã, avós e tios, por acreditarem sempre em mim e nas minhas capacidades, por me deixarem seguir os meus sonhos, estarem presentes e proporcionarem-me o melhor futuro

possível. Por todos os valores, princípios e educação que me transmitiram e me tornaram na pessoa que sou hoje.

Por fim, ao Toby e à Julieta, os meus cães, companheiros de todas as horas, por todos os beijinhos e abraços fornecidos quando eu mais precisava.

RESUMO

Esta dissertação baseia-se no estudo da dinâmica sedimentar da baía de Porto Santo, sendo o seu principal objetivo proporcionar ferramentas de apoio para uma gestão costeira eficaz na região. Este estudo é fundamental para compreender como os sedimentos se movem, para onde se deslocam e que impacto têm na morfologia costeira. Para isso, foram estabelecidos quatro objetivos secundários: caracterizar os sedimentos na área, estudar as condições de agitação marítima, avaliar o potencial de transporte sedimentar e contribuir para a interpretação dos processos sedimentares.

Os métodos utilizados envolveram análise de dados sedimentares, aplicação de modelos de propagação marítima (*SWAN*), cálculo do potencial de remobilização sedimentar e interpretação geomorfológica. A avaliação do potencial de transporte ou remobilização sedimentar foi realizada com modelos de cálculo do limiar de remobilização sedimentar implementados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (*ArcGIS Pro*) que utilizam os resultados (espaciais) da propagação da agitação marítima na determinação (espacial) do potencial de remobilização. A análise do potencial de remobilização sedimentar destacou as áreas mais suscetíveis à remobilização, considerando sedimentos de diferentes diâmetros e eventos específicos, como o temporal de 2 de setembro de 1987. Além disso, identificou-se que a direção de remobilização segue a direção das ondas.

Em resumo, os resultados mostram que a agitação marítima desempenha um papel fundamental na distribuição dos sedimentos nas zonas de plataforma insular, junto à costa.

Palavras-chave: Porto Santo, *SWAN*, Remobilização sedimentar, Dinâmica sedimentar, Ferramenta de potencial de remobilização sedimentar

ABSTRACT

This dissertation studies the sedimentary dynamics of the bay of Porto Santo, and its main objective is to provide support tools for an effective coastal management in the region. This study contributes to the understanding how sediments move, where they move, and what impact they have on coastal morphology. To this end, four secondary objectives were established: to characterize the sediments in the area, to study the wave conditions, to evaluate the potential for sedimentary transport and to contribute to the interpretation of sedimentary processes.

The methods used involved sedimentary data analysis, application of wave propagation models (SWAN), calculation of the potential of sediment remobilization and geomorphological interpretation. The evaluation of the sediment transport or remobilization potential was performed with remobilization threshold calculation models implemented in a Geographic Information Systems (ArcGIS Pro) environment that use the (spatial) results of the wave propagation in the (spatial) determination of the remobilization potential. The analysis of the potential for sedimentary remobilization highlighted the areas most susceptible to remobilization, considering sediments of different diameters and specific events, such as the storm of September 2, 1987.

In addition, it was identified that the direction of the potential remobilization follows the direction of the waves. In summary, the results show that wave regime plays a key role in the distribution of sediments in the island shelf areas, close to the coast.

Keywords: Porto Santo, SWAN, Sedimentary remobilization, Sedimentary dynamics, Potential for sedimentary remobilization tool

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	IV
ABSTRACT	VI
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
SÍMBOLOS	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. ENQUADRAMENTO DA ÁREA EM ESTUDO	5
3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO.....	5
3.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO	5
3.3 ENQUADRAMENTO OCEANOGRÁFICO	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS	9
4.1 PROCESSAMENTO DE DADOS.....	9
4.1.1.1 SUPERFICIAL.....	9
4.1.1.2 EM PROFUNDIDADE	12
4.1.2.1 AO LARGO (REGIME MÉDIO, MODAL E TEMPORAIS).....	13
4.1.2.2 JUNTO À COSTA	14
4.1.3.1 CRITÉRIOS GEOMORFOLÓGICOS.....	15
4.1.3.2 MARCAÇÃO DOS LIMITES GEOMORFOLÓGICOS.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTAR DA PLATAFORMA INSULAR DE PORTO SANTO.....	22
5.2 FORÇAMENTO OCEANOGRÁFICO	24
5.2.1 OFFSHORE.....	24
5.2.2 JUNTO À COSTA	28
5.2.3 LIMITES MORFOLÓGICOS DA PLATAFORMA INSULAR.....	32
5.3 LIMITES GEOMORFOLÓGICOS DA PLATAFORMA INSULAR.....	32
5.4 REMOBILIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA PARA A BAÍA DE PORTO SANTO.....	33

6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	41
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
8.	ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Enquadramento Geográfico da ilha do Porto Santo. A) Arquipélago da Madeira e Portugal Continental; B) Arquipélago da Madeira; C) Ilha de Porto Santo (Área de estudo).....	5
Figura 3.2: Mapa geológico da ilha do Porto Santo, simplificado e adaptado de Ferreira & Neiva (1996) e Schmidt & Schmincke (2002) (extraído de MATA et al., 2013).	6
Figura 4.1: Mapa de distribuição do diâmetro médio do sedimento (D50), retirado de Instituto Hidrográfico (2001).....	9
Figura 4.2: Registo fotográfico da recolha de uma das amostras.....	10
Figura 4.3: Localização das amostras recolhidas e, posteriormente, analisadas.	10
Figura 4.4: Registo fotográfico das amostras analisadas: A) lavagem; B) quarteamento; C) crivagem a seco; D) identificação.....	11
Figura 4.5: Localização das sondagens da FCUL e da DRAAC analisadas previamente, a azul e a laranja, respetivamente. Adaptado do relatório LIFE Dunas 2021 -Análise Preliminar dos dados de sondagem na baía de Porto Santo – Espessura de sedimentos e possíveis locais.....	12
Figura 4.6: Malhas batimétricas utilizadas e posição utilizada do ponto Era5.....	14
Figura 4.7: Modelo conceptual utilizado para a definição dos critérios geomorfológicos da plataforma, adaptado de Bosnic (2017).	15
Figura 4.8: Fluxograma referente ao procedimento do modelo.	20
Figura 4.9: Ferramenta gerada através do modelo criado para o Cálculo da Remobilização de Sedimentos de Ondas Policromáticas.	21
Figura 5.1: Gráfico representativo da frequência acumulada, em ϕ , das amostras analisados perfil W.	22
Figura 5.2: Gráfico referente à relação entre o D50_FCUL e o D50_IH.	23
Figura 5.3: Gráfico correspondente à variação da altura significativa, período de pico e direção média ao longo da escala temporal utilizada.....	24
Figura 5.4: Gráfico resultante da leitura do objeto WaveTimeSeries, com os 4 cenários predominantes.	24
Figura 5.5: Variação dos valores médios da altura significativa, período médio e período de pico, na área em estudo.	25
Figura 5.6: Gráfico correspondente à variação da altura significativa, período médio, período de pico e direção média ao longo da escala temporal utilizada referente a temporais.....	25
Figura 5.7: Variação dos valores médios da altura significativa, período médio e período de pico, na área em estudo, para o temporal de 2 de setembro de 1987.	26
Figura 5.8: Variabilidade da direção das ondas ao longo da baía, tendo em conta os cenários predominantes. A direção 1 é referente ao cenário 1, a direção 2 ao cenário 2, a direção 3 ao cenário 3 e, por fim, a direção 4 ao cenário 4.	28
Figura 5.9: Variabilidade do Hs das ondas ao longo da baía, tendo em conta os cenários predominantes. O Hs 1 é referente ao cenário 1, o Hs 2 ao cenário 2, o Hs 3 ao cenário 3 e, por fim, o Hs 4 ao cenário 4.....	29
Figura 5.10: Variabilidade do Tm das ondas ao longo da baía, tendo em conta os cenários predominantes. O Tm 1 é referente ao cenário 1, o Tm 2 ao cenário 2, o Tm 3 ao cenário 3 e, por fim, o Tm 4 ao cenário 4.....	30
Figura 5.11: Mapa representativo dos 3 pontos à mesma profundidade (10 m) junto à baía para determinação dos parâmetros de direção, altura significativa e período médio.	31

Figura 5.12: Mapa com representação dos limites geomorfológicos da plataforma insular de Porto Santo, determinados por wave base, mid shelf limit e Inner shelf limit. Associado ao método indireto que prevê a profundidade em função dos parâmetros médios de agitação.	33
Figura 5.13: Mapa de declives da plataforma insular de Porto Santo.	33
Figura 5.14: Potencial de remobilização para o cenário 1.	34
Figura 5.15: Potencial de remobilização para o cenário 2.	35
Figura 5.16: Potencial de remobilização para o cenário 3.	36
Figura 5.17: Potencial de remobilização para o cenário 4.	37
Figura 5.18: Potencial de remobilização para o temporal de 2 de setembro de 1987.	38
Figura 5.19: Mapa de potencial de remobilização do cenário 1, cenário 3 e cenário de temporal, com os vetores referentes à direção de tendência de remobilização.	Erro! Marcador não definido.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1: Distribuição granulométrica pelo Método Folk & Ward e respectivas percentagens de areia das amostras analisadas do perfil W, gerada através do Gradistat.	22
Tabela 5.2: Comparação de valores de D50 entre a análise efetuada pelo IH e a análise efetuada pela FCUL.....	23
Tabela 5.3: Cenários predominantes considerados para o cálculo das diferentes remobilizações.	25
Tabela 5.4: Tabela correspondente às estatísticas obtidas para a série temporal geral.	26
Tabela 5.5: Tabela correspondente às ocorrências de temporais ao longo da sequência temporal com a respetiva média das variáveis em causa.	27
Tabela 5.6: Valores referentes a cada parâmetro da agitação marítima para cada ponto selecionado. .	31
Tabela 5.7: Valores relevantes para o Cálculo da Inner Shelf e o seu respetivo valor.....	32
Tabela 5.8: Valores relevantes para o Cálculo da Mid Shelf e o seu respetivo valor.	32
Tabela 5.9: Valores relevantes para o Cálculo da Wave Base e o seu respetivo valor.....	32

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 3.1: Equação utilizada para definir a profundidade do limite Inner Shelf.	16
Equação 3.2 Equação utilizada para calcular a velocidade orbital crítica.	16
Equação 3.3: Equação utilizada para definir a profundidade do limite Mid Shelf.	16
Equação 3.4: Equação utilizada para definir a profundidade de Wave Base.	17

LISTA DE ABREVIATURAS

BM – Baixa-mar;

DoC – *Depth of closure*;

DoT – Profundidade máxima de transporte significativo de sedimentos;

DRAAC – Direção Regional do Ambiente e Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira;

FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;

GEBCO – *General Bathymetric Chart of the Oceans*;

H_c – Profundidade de fecho (m);

H_{in} – *Inner Shelf* / Plataforma interna (m);

H_{mid} – *Mid Shelf* / Plataforma intermédia (m);

H_s – Altura Significativa (m);

IH – Instituto Hidrográfico;

NMM – Nível médio do mar;

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*;

PM – Preia-mar;

T_m – Período médio (s);

T_p – Período de pico (s);

Urms – Média quadrática da velocidade orbital (m/s);

W_b – *Wave Base* /Limite de base da onda (m);

ZH – Zero Hidrográfico

SÍMBOLOS

A – Amplitude orbital (m);

U_w – Amplitude da velocidade orbital (m/s);

θ_{cr} – *Shields* crítico;

ρ – Densidade do fluido (kg/m³);

ρ_s – Densidade do sedimento (kg/m³);

D_a – Diâmetro de partícula adimensional;

D₅₀ – Distribuição do diâmetro mediano do sedimento (φ);

F_{ws} – Fator de atrito em escoamentos suaves;

F_{wr} – Fator de atrito em escoamentos turbulentos rugosos;

R_w – Número de Reynolds de onda;

s – Razão entre a densidade do sedimento e a densidade do fluido;

Kn – Rugosidade Equivalente (m);

r – Rugosidade relativa (m);

τ_{cr} – Tensão crítica (N/m²);

τ_w – Tensão de atrito (N/m²);

ν – Viscosidade cinemática (m²/s);

1. INTRODUÇÃO

Dada a dependência socioeconômica da praia do Porto Santo, devido ao turismo, é de extrema importância perceber a dinâmica sedimentar do sistema praia-duna-plataforma interna na baía do Porto Santo. Sendo a areia um recurso finito, avaliar as trocas sedimentares entre os diferentes ambientes deste sistema é essencial para fornecer ferramentas de apoio para uma gestão costeira adequada e ainda propor possíveis medidas de adaptação às alterações climáticas futuras.

As características geomorfológicas das zonas costeiras, assim como as sedimentares, refletem as relações dos agentes forçadores, como a agitação marítima. A generalidade das zonas costeiras insulares portuguesas encontra-se em ambiente essencialmente dominado por ondas, com uma variedade dimensional de sedimentos (areia, calhaus e cascalhos) que são redistribuídos ao longo do litoral. Esses sedimentos podem ser transportados para áreas adjacentes, como praias ou enseadas, onde são depositados. A evolução costeira é afetada e modelada pelos processos de erosão, de transporte e da respetiva deposição, sendo o principal agente destes processos as ondas e, como fontes secundárias e com menos impacto as marés e as suas correntes, o vento e processos de sedimentação fluvial. A interação desses fatores determina a complexa dinâmica sedimentar nas zonas costeiras e a formação de diferentes tipos de ambientes costeiros, como praias, falésias, estuários e deltas.

A agitação marítima, principalmente durante tempestades e condições de temporal, desempenha um papel fundamental na distribuição dos sedimentos nas zonas costeiras, podendo causar erosão ou remobilização sedimentar. A direção e intensidade do transporte sedimentar influencia a deposição dos sedimentos em diferentes áreas, dependendo do ângulo de incidência das ondas, da profundidade e da topografia do fundo do mar, bem como das próprias características dos sedimentos.

Segundo Clímaco et al. (2005), no Porto Santo, a agitação marítima é um fator dominante na distribuição dos sedimentos nas zonas costeiras, uma vez que, a ação das ondas e correntes marinhas têm influência na deposição dos sedimentos em diferentes áreas. A ondulação é gerada no Atlântico Norte, contudo afeta predominantemente a ilha do Porto Santo a NW.

A zona costeira, no que diz respeito à sua definição dos seus limites geográficos, é um pouco dúbia, no entanto, segundo Davidson-Arnott (2011), a linha de costa é considerada como o seu limite terrestre enquanto o seu limite marítimo corresponde a um limite fictício, no mar, onde a profundidade é elevada o suficiente para que o fundo oceânico não sofra influência das ondas de tempestade. Este limite pode variar dependendo das características topográficas do fundo do mar, estando também sujeito a flutuações de curto prazo, sazonais ou a escalas temporais mais alargadas.

A *DoC* é um conceito teórico utilizada para limitar duas zonas de atividade morfodinâmica diferente ao longo do perfil da praia, em escalas de tempo de curto e médio prazo, de 1 a 10 anos.

A face superior da costa pode ser descrita como a área onde são detetadas as alterações significativas no perfil da praia, ao passo que, a face inferior corresponde à área que se estende desde o limite de alteração significativa até à base da onda onde as alterações morfológicas são praticamente inexistentes. A transição entre a face superior e inferior é denominada por *DoC*, enquanto a extensão em direção ao mar da face inferior é denominada por *DoT*.

Assim, a *DoC* representa um limite morfodinâmico que separa uma região ativa morfodinamicamente, em direção à terra (Hallermeier, 1981; Hinton e Nicholls, 1998; Nicholls et al., 1998b), de uma região considerada morfodinamicamente não ativa, em direção ao mar (Valiente et al, 2019).

Segundo Bosnic (2017), o equilíbrio no balanço sedimentar é fulcral para o sistema costeiro uma vez que, quaisquer desequilíbrios causados, como a subida do NMM ou a ocorrência de temporais extremos, podem provocar processos erosivos. Estes processos afetam frequentemente os sistemas praia-duna, uma vez que a estabilidade das zonas litorais fica comprometida e resulta geralmente no recuo da linha de costa com escarpamento nos sistemas dunares. Quando os sedimentos remobilizados durante estes eventos saem do sistema praia-duna-plataforma interna, por exemplo pelos limites laterais da respetiva célula sedimentar, ou para profundidades tais que a areia não consegue retornar por processos naturais, o sistema entra em défice sedimentar com impactos relevantes em locais significativamente dependentes do equilíbrio no balanço sedimentar.

Sendo assim, perceber este equilíbrio dinâmico é fundamental para a própria gestão dos recursos sedimentares locais, de modo a manter o sistema praia-duna robusto o suficiente. Adicionalmente, segundo Bosnic (2017), a definição de profundidade de fecho (*DoC* – profundidade empírica limite – do lado de mar – para a ocorrência de variações morfológicas significativas (Nicholls et al., 1998)), gera algumas incertezas no que diz respeito às trocas sedimentares entre a praia e a plataforma continental. Apesar da escala temporal que atua nestas trocas ser uma grande fonte de incerteza, a própria *DoC* levanta dúvidas sobre a real importância ou magnitude destas trocas sedimentares. Diversos autores defendem que não existe transporte significativo dos sedimentos para o lado de mar a partir da *DoC* (por exemplo Brunn, 1962; Hallermeier, 1981; Rosati, 2005; Rosati et al., 2013, in Bosnic, 2017), isto porque não existem alterações geomorfológicas significativas que causem impactos mínimos na praia (Robertson et al., 2008, in Bosnic, 2017). Não obstante, segundo Nicholls et al. (1998), a ausência de alterações geomorfológicas significativas não implica a ausência total de transporte sedimentar que se espera ocorrer, especialmente durante condições de ondas de alta energia.

A *DoC* pode ser determinada através de vários métodos empíricos e morfológicos, segundo Valiente et al. (2019), existindo 3 métodos:

- Método baseado na observação direta de dados morfológicos do fundo, que define a *DoC* em perfis topográficos transversais à praia, posicionando o limite no ponto onde as variações do fundo são consideradas insignificantes ($< 0.14\text{m}$ em Valente et al. (2019)). Este método permite assim determinar o ponto no perfil da praia onde as variações morfológicas se estabilizam, de forma que indiquem um equilíbrio entre os processos de erosão e sedimentação;
- Métodos indiretos que preveem esta profundidade em função de parâmetros médios de agitação marítima ao largo (*wave-based parametric*), como a formulação empírica de Hellermeier (1978);
- Métodos baseados no cálculo das tensões de atrito junto ao fundo – *bed shear stress* (Soulsby, 1997).

Relativamente aos processos físicos associados a estas alterações geomorfológicas, o principal fator para que ocorra uma nova suspensão e transporte dos sedimentos já depositados no fundo oceânico, é a tensão de atrito induzida pelas ondas, que ocorre neste local.

Segundo Andrade et al. (2017), na plataforma insular sul, com exceção das zonas de afloramento rochoso, as areias médias ocorrem ao longo de todas as profundidades e, as areias finas ocorrem entre os 10 e os 30 m de profundidade (estando os principais depósitos sedimentares localizados entre a Ponta da Calheta e os afloramentos rochosos do Cabeço da Ponta, e entre a Vila Baleira e a Ponta da Galé). Por sua vez, as areias grosseiras e cascalhos ocorrem associados aos afloramentos rochosos e a cerca de 30 m de profundidade. Relativamente à calibração das areias, as areias finas e médias são bem calibradas

quando comparadas com os depósitos ricos em frações grosseira e fina (silto-argilosa) mais mal calibradas.

Como suprarreferido, a plataforma continental é bastante dinâmica no que diz respeito às trocas sedimentares associadas às ondas de superfície e às correntes permanentes. Estes dois agentes têm um papel preponderante no transporte sedimentar ao longo da plataforma, assim, qualquer previsão do efeito das ondas e correntes junto ao fundo é fundamental para uma possível previsão da remobilização (Taborda, 2015). Os principais processos físicos responsáveis pela dinâmica sedimentar na plataforma interna são as forças de atrito como, por exemplo, as tensões de atrito associadas às ondas e a sua proporção relativamente à tensão crítica (tensão de atrito mínima) associada ao movimento das partículas. A tensão crítica é a tensão mínima necessária para movimentar uma dada partícula. Quando as tensões de atrito associadas às ondas superam a tensão de atrito crítico pode ocorrer movimentação de partículas.

Como as correntes na baía são praticamente inexistentes ou nulas (Andrade et al., 2017), as ondas passam a ter um papel fundamental no transporte ao longo da baía. Segundo Taborda (2015), as ondas sofrem deformação (as cristas tornam-se mais pontiagudas e as cavas mais achatadas) ao serem propagadas para a costa e com a diminuição da profundidade. Assim, é criada uma assimetria na velocidade que estando associada a transporte sedimentar pode ter importância no equilíbrio do sistema.

De forma a compreender o sistema da baía de Porto Santo é desejável elaborar um modelo conceptual da dinâmica sedimentar que ajudem na elaboração de previsões morfodinâmicas nestes ambientes.

Este trabalho tem como objetivo aumentar o conhecimento sobre a dinâmica sedimentar da baía de Porto Santo, que se enquadra na plataforma insular, contribuindo com informação que sobre a sedimentologia desta bem como o potencial de remobilização sedimentar em resposta aos principais agentes forçadores (agitação marítima) da praia do Porto Santo.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é contribuir para o conhecimento sobre a dinâmica sedimentar da baía do Porto Santo. Para tal, foram definidos quatro objetivos de trabalho secundários:

- I. Caracterizar os sedimentos existentes na baía e investigar a sua variabilidade espaço-temporal;
 - a. Analisar sondagens verticais curtas em profundidade, realizadas em diversos locais da plataforma insular de Porto Santo, de forma a investigar as variações sedimentares no passado recente;
 - b. Realizar amostragem sedimentar superficial nos ambientes de praia submarina, praia emersa e dunas, de forma a caracterizar determinadas propriedades físicas (e.g. textura) e químicas (e.g. composição) do sedimento local e relacioná-las com as trocas sedimentares e a dinâmica sedimentar destes ambientes que ocorrem atualmente;
- II. Caracterizar o clima de agitação marítima ao largo e junto à costa, na zona da baía;
 - a. Aplicar modelos de propagação de agitação marítima do largo para a baía (*wave-based* e *bed shear stress*), de forma a caracterizar o forçamento junto à costa;
- III. Avaliar o potencial de transporte ou remobilização sedimentar em resposta;
 - a. Aplicar modelos de cálculo do limiar de remobilização sedimentar em ambientes de plataforma, tendo como forçamento as ondas.
- IV. Interpretar, ou contribuir para a interpretação dos processos sedimentares da baía (praia e plataforma), através de um modelo conceptual interpretativo.

3. ENQUADRAMENTO DA ÁREA EM ESTUDO

3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A ilha do Porto Santo, encontra-se localizada no Atlântico N, a NE da ilha da Madeira, e faz parte do arquipélago formado pela ilha da Madeira e pelas ilhas Desertas e Selvagens. Possui uma área emersa total de aproximadamente 40km² e mostra um conjunto de ilhéus – destacando-se o ilhéu de Cima e o ilhéu de Baixo (ou ilhéu da Cal). Apresenta um alongamento NE-SW, com cerca de 11 km de comprimento e 5 km de largura máxima. Esta dissertação incide essencialmente na zona costeira S da baía, por corresponder a um sistema de praia, de valor socioeconómico significativamente elevado tanto para a ilha do Porto Santo, quanto para região da Madeira, onde as trocas sedimentares são importantes de compreender (**Figura 3.1**).

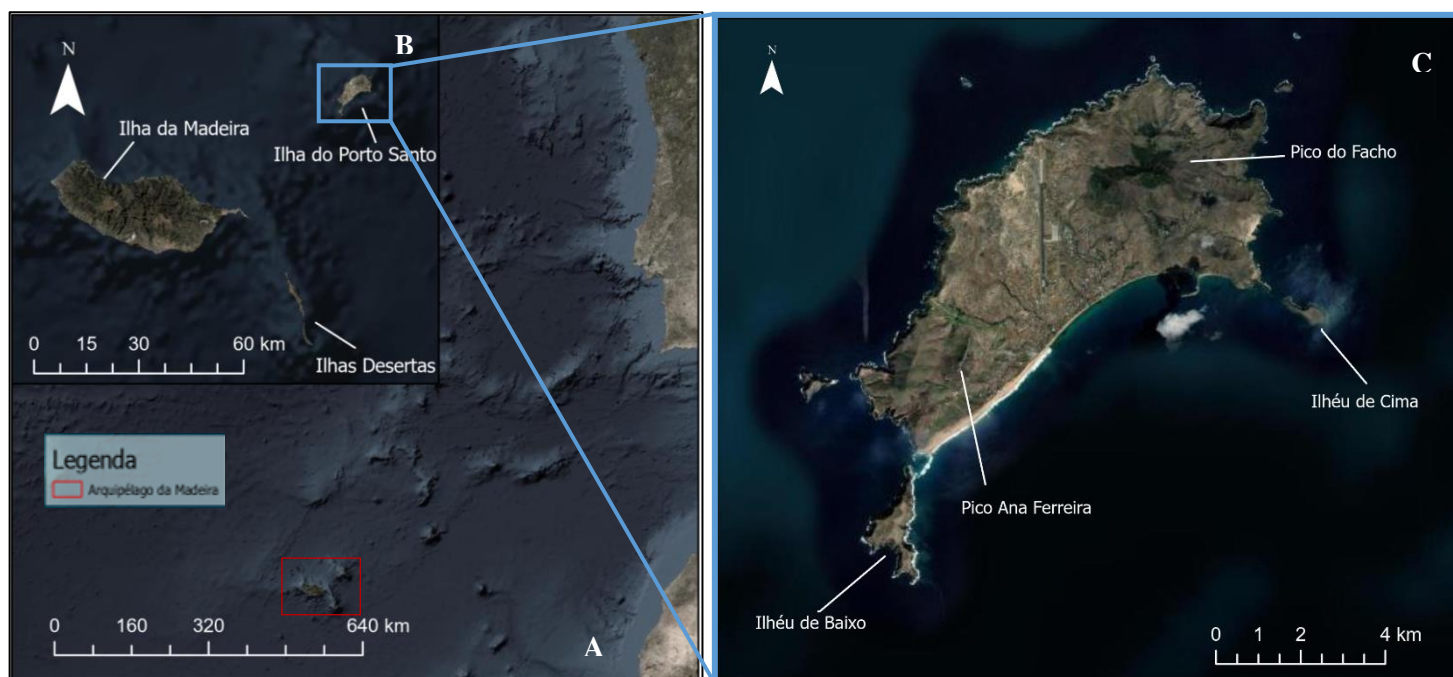


Figura 3.1: Enquadramento Geográfico da ilha do Porto Santo. A) Arquipélago da Madeira e Portugal Continental; B) Arquipélago da Madeira; C) Ilha de Porto Santo (Área de estudo).

3.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

A ilha do Porto Santo resultou da instalação de uma pluma mantélica, associada ao limite intraplaca da placa africana e representa o edifício vulcânico mais antigo, apresentando uma morfologia significativamente plana (Mata et al. 2013) (**Figura 3.2**). A ilha é caracterizada por uma elevada diversidade de rochas aflorantes, incluindo rochas vulcânicas básicas, rochas vulcânicas intermédio-ácidas e rochas sedimentares (Andrade et al. 2017). As formações mais antigas, referentes ao Miocénico Inferior, que representam um ambiente submarino são compostas por hawaiitos, traquitos, escoadas hialoclasticas e depósitos vulcanoclastíficos submarinos com intercalações de escoadas submarinas de basaltos (Ferreira, 1985). Durante o Miocénico Inferior e Médio, ocorreu a fase de transição entre o vulcanismo submarino e o subaéreo, sendo que as formações características desse evento são calcários coralíferos, os conglomerados, os tufitos e os arenitos. No final do Miocénico, o ambiente tornou-se

totalmente subaéreo com hawaiitos, traquitos, riólitos, mugaritos e escoadas efusivas basálticas a serem as formações predominantes. As mais recentes e, por isso, referentes ao Quaternário são representadas por terraços marinhos, depósitos fluviais e de vertente, eolianitos e paleossolos (Ferreira e Neiva, 1996).

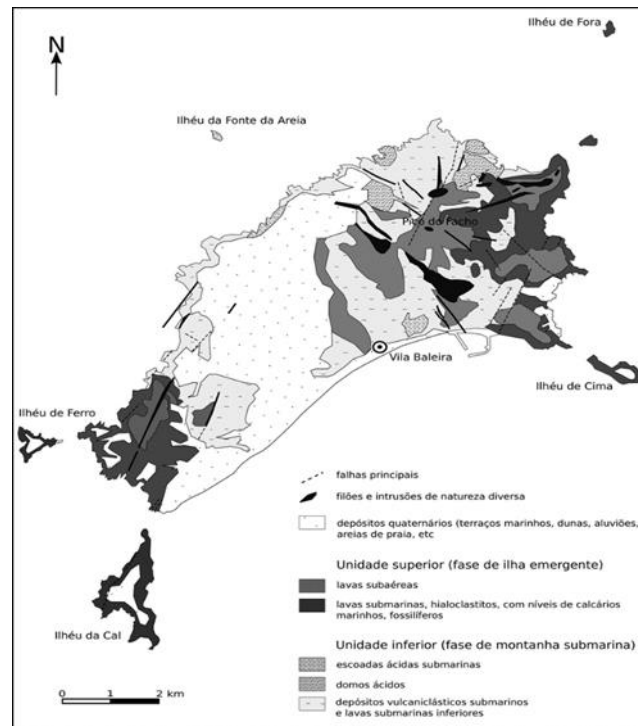


Figura 3.2: Mapa geológico da ilha do Porto Santo, simplificado e adaptado de Ferreira & Neiva (1996) e Schmidt & Schmincke (2002) (extraído de MATA et al., 2013).

Segundo Andrade et al. (2017), a morfologia da ilha é condicionada não só pela geologia presente, como também pelo clima semiárido do tipo estepário (segundo a classificação climática de Köppen-Geiger). A nível geomorfológico, a ilha apresenta relevo essencialmente raso, principalmente na sua zona central, porém ocorrem alguns relevos vigorosos, como é o caso do pico do Facho a NE e o pico Ana Ferreira a SW. A costa a N é crenulada e com arribas abruptas e escassas praias encaixadas. Já na costa a S, esta diferencia-se pela presença de uma extensa baía arenosa arqueada que constitui a praia do Porto Santo.

A praia do Porto Santo tem cerca de 7 km de extensão a W e 600 m a E, e é essencialmente baixa e arenosa, formando uma baía com um sistema dunar associado, interrompido em diversos locais por zona urbana. A areia da baía corresponde a um depósito de cobertura com espessura variável, geralmente reduzida. Nos locais com menor espessura, com a variação da agitação marítima sazonal e inter-anual, o substrato rochoso fica exposto. De notar que, devido à geomorfologia da ilha, a espessura tende a ser maior na zona central. As areias têm composição carbonatada, tendo na sua constituição fragmentos fósseis de algas calcárias e conchas de moluscos – resultantes da erosão dos eolianitos (Andrade et al. 2017).

Segundo Andrade (2008) e Silva et al. (2019), a praia do Porto Santo é uma praia intermédia a refletiva, com um perfil transversal que inclui, geralmente, uma berma estreita e uma face de praia que se

desenvolve, para lado de mar, até um raso de maré arenoso, na zona central da baía, e até uma plataforma rochosa sub-tidal, nas zonas SW e NE da praia. Segundo os mesmos autores, as perdas de areia pelo boqueirão de baixo, indicam haver um transporte residual de areia, bastante próximo da linha de costa, a profundidades inferiores a 4.5 m, no sentido NE-SW, ou seja, quando a praia termina e quando começa a plataforma.

Em relação à variação espacial, na face de praia os sedimentos são mais finos e bem calibrados, quando comparados com os sedimentos da berma (Andrade et al., 2008).

O sistema dunar da baía é constituído por uma primeira duna frontal ativa, no setor a oeste e, por uma segunda duna separada da primeira por uma depressão interdunar (nem sempre observável). As areias constituintes da duna frontal são médias e finas na zona este, sendo muito bem calibradas. Já as areias da segunda duna são finas a médias e bem a muito bem calibradas. (Andrade et al., 2017).

A plataforma insular da ilha é assimétrica, mais desenvolvida na região N e tem cerca de 100 m de profundidade. Relativamente à largura, apresenta algumas variações, principalmente, na zona W e na zona E, tendo estas cerca de 1 km e 2.5 km, respetivamente. Os sedimentos que cobrem a plataforma são essencialmente arenosos, com maior destaque para sedimentos resultantes da erosão dos afloramentos eolianíticos que cobrem grande parte da ilha. Estes eolianitos formaram-se aquando da descida do nível no mar, durante o Holocénico, por erosão eólica da plataforma biogénica então emersa, resultando em estruturas dunares bioclásticas que posteriormente consolidaram (eolianito). Relativamente à dimensão das areias, estas tendem a ser grosseiras, muito grosseiras ou até mesmo cascalhentas nos afloramentos rochosos, zonas adjacentes aos ilhéus. Quanto à calibração, os depósitos finos e médios são melhor calibrados quando comparados com os depósitos grosseiros (IH, 2008).

3.3 ENQUADRAMENTO OCEANOGRÁFICO

O arquipélago da Madeira está exposto às condições marítimas geradas na região do Atlântico Norte. Pelo que as suas ilhas principais (Madeira e Porto Santo) são diretamente influenciadas pelas massas de ar e pelas correntes marítimas que atravessam o atlântico Norte.

A ilha do porto santo está sujeita a um regime de maré mesotidal e semidiurno regular com amplitudes média de 1.4 m, máxima de 2.4 m e mínima de 0.3 m, acima do ZH. Não obstante, estes valores alteram um pouco, sendo a amplitude média de 1.5 m acima do ZH e a máxima de 2.9 m acima do ZH.

A ilha do porto santo está sujeita a um regime de maré mesotidal semidiurno, com uma amplitude de maré média de 2.1 m em marés-vivas (dados da Carta Náutica 36401 publicada pelo Instituto Hidrográfico, in Andrade et al., 2008). As correntes associadas à maré são pouco expressivas, embora as maiores intensidades ocorram durante as marés vivas, junto a sul do Ilhéu de Cima. Na baía, as correntes são fracas ou nulas, exceto nos canais do Boqueirão de Baixo e de Cima, onde adquirem importância devido à pequena profundidade e constrição lateral. Durante as enchentes e vazantes de marés vivas, as correntes fazem-se sentir, podendo estas atingir maiores velocidades ao largo dos cabos e penínsulas mais salientes, sobretudo a sul do ilhéu de Baixo e do ilhéu de Cima. Durante a enchente, a maré provém de sul e as águas dirigem-se para oeste ou nordeste, enquanto na vazante propaga-se de nordeste e correm para sudoeste (Instituto Hidrográfico, 2001; Andrade et al., 2008).

Entre 2005 e 2016, o regime de ondas em águas profundas ao largo da costa N é caracterizado por uma altura significativa média anual de ondas de 2.4 m e um período de pico de 10.6 s, com uma direção média de 333°, aproximadamente NNO. Nas zonas costeiras voltadas a S e SE, existe um contraste de exposição energética, uma vez que estas estão abrigadas das ondas que são predominantes de N. Este efeito de abrigo afeta a direção e energia das ondas que se propagam em direção à costa S e que, eventualmente, atingem as praias da ilha do Porto Santo com níveis de energia significativamente mais baixos (Silva et al., 2019 – Supplementary Material – 3).

Segundo Silva et al., 2019 – Supplementary Material – 3), a praia do Porto Santo pode ser caracterizada como um ambiente de baixa energia, onde a altura significativa média das ondas varia entre 0.3m e 0.4m. A distribuição do Hs é condicionada pela direção das ondas *offshore*, enquanto localmente, é influenciada pelo efeito de abrigo proporcionado pelos ilhéus de cima e de baixo. A energia das ondas propagada na baía diminui consideravelmente devido aos estreitos existentes entre a ilha principal e os ilhéus adjacentes. Como resultado, a região central da baía exibe condições menos energéticas, resultando em alturas de ondas inferiores quando comparadas com as alturas das ondas das extremidades.

De acordo com o mesmo autor, o regime das ondas da baía do Porto Santo é extremamente afetado pela sazonalidade, refletindo-se na altura (e energia) das ondas e na propagação direcional. Assim, durante o inverno, as ondas apresentam alturas mais elevadas, com valores de Hs superiores a 0.3 m e uma dispersão direcional reduzida. Por outro lado, no verão, os valores de Hs diminuem, geralmente não ultrapassando 0.30 m

Relativamente ao nível médio do mar, verifica-se que na região da Madeira (mais concretamente no Funchal) existe uma tendência para a subida do NMM em cerca de 0.9 mm/ano, que tem acompanhado a tendência de evolução global sendo previsível o seu aumento nos próximos anos, tendo em conta o cenário intermédio NOAA (Silva et al, 2019 & NOAA, 2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROCESSAMENTO DE DADOS

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTAR DA PLATAFORMA INSULAR DE PORTO SANTO

4.1.1.1 SUPERFICIAL

A caracterização sedimentar superficial da plataforma insular de Porto Santo fez-se por análise dos dados disponibilizados na bibliografia, nomeadamente o trabalho do IH (Instituto Hidrográfico, 2001) que representa um mapa de distribuição do diâmetro mediano do sedimento (D_{50}) (**Figura 4.1**).

Adicionalmente foram analisadas amostras superficiais recolhidas numa campanha de campo, realizada no âmbito do projeto LIFE Dunas.

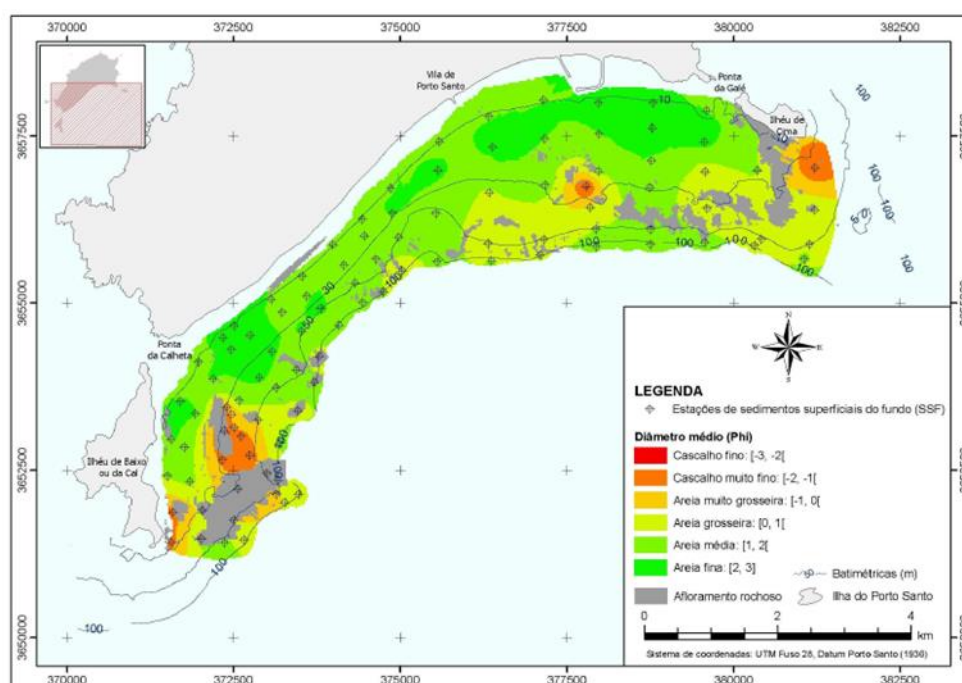


Figura 4.1: Mapa de distribuição do diâmetro médio do sedimento (D_{50}), retirado de Instituto Hidrográfico (2001).

A campanha de recolha de amostras superficiais de sedimento realizou-se com o auxílio de uma draga “Petit Ponar”, a bordo de uma lancha polícia marítima do Porto Santo e através de colheita direta na praia (duna, berma e face de praia) (**Figura 4.2**). No total foram efetuados 23 pontos de amostragem, 17 das quais foram colhidas entre 5 a 10 cm de profundidade, e as restantes 6 foram colhidas na praia (duna, berma e face de praia).



Figura 4.2: Registo fotográfico da recolha de uma das amostras.

As 23 amostras recolhidas distribuem-se ao longo de dois perfis perpendiculares à plataforma – 8 amostras realizaram-se na zona W e 15 amostras na zona E da baía. Em cada perfil 3 amostras são referentes a amostras da duna, da berma e da face de praia (**Figura 4.3**). No perfil W a profundidade máxima é de 25.87 m e no perfil E é de 26.26 m.

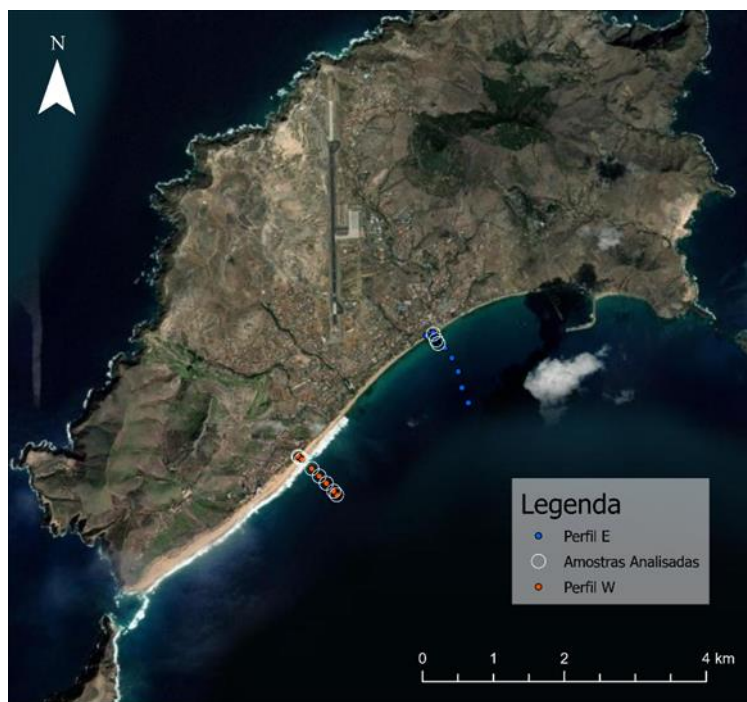


Figura 4.3: Localização das amostras recolhidas e, posteriormente, analisadas.

Em laboratório, foi realizada a granulometria por peneiração a seco, para isso, as amostras recolhidas foram lavadas (**Figura 4.4, A**), secas e quarteadas de modo a obter cerca de 90 a 100g de sedimento (**Figura 4.4, B**). Posteriormente, de forma a caracterizar a textura dos sedimentos, foi utilizado um agitador com 13 crivos (-2ϕ a 4ϕ , de 0.5ϕ em 0.5ϕ) e um fundo, durante 10 minutos (**Figura 4.4, C**). De seguida, cada fração de sedimento retida em cada crivo foi pesada, de forma a calcular o peso total final e o respetivo erro associado. Por fim, cada classe dimensional foi colocada em sacos de plástico devidamente selados e identificados (**Figura 4.4, D**).

De forma a caracterizar texturalmente os sedimentos, foram calculados diversos parâmetros estatísticos, através do método gráfico (Folk & Ward (1957)), e através do programa *Gradistat*, como a média, o desvio padrão e a assimetria, e foram construídas as curvas granulométricas para cada amostra.

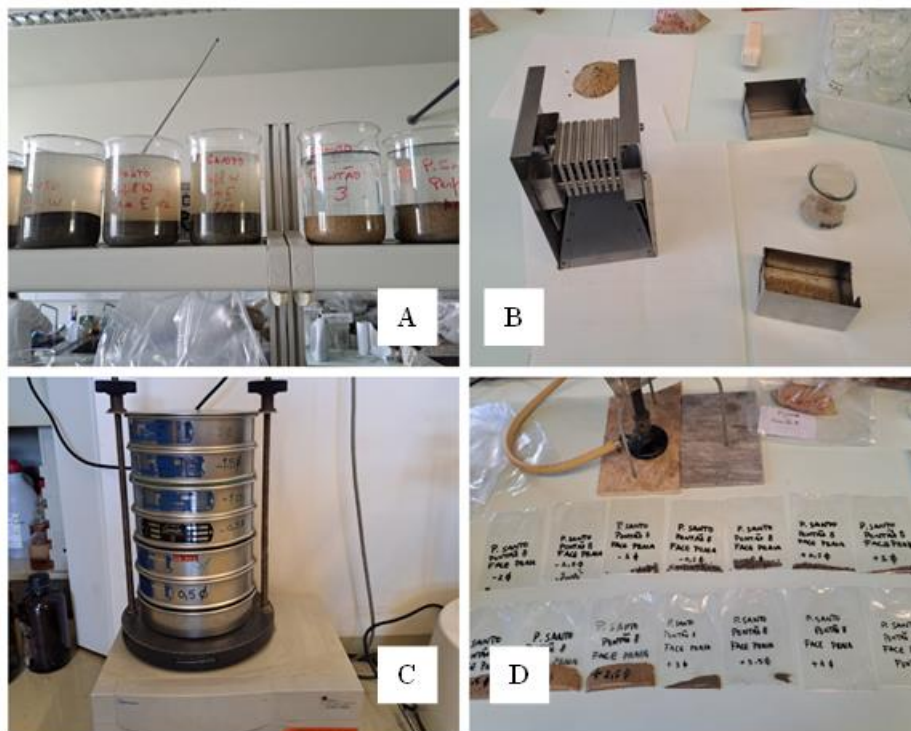


Figura 4.4: Registo fotográfico das amostras analisadas: A) lavagem; B) quarteamento; C) crivagem a seco; D) identificação.

4.1.1.2 EM PROFUNDIDADE

De forma a efetuar a observação visual dos sedimentos em profundidade recorreu-se a algumas sondagens verticais curtas realizadas no âmbito do projeto LIFE Dunas (10 estações efetuadas pela FCUL e 9 pela DRAAC¹). As sondagens foram recolhidas ao longo da baía do Porto Santo a uma profundidade entre os 10 e os 15 m (Figura 3) em julho de 2021 com recurso a mergulho submarino. Foram utilizados os resultados preliminares descritos nos relatórios LIFE Dunas 2021 – Análise Preliminar dos dados de sondagem na baía de Porto Santo – Espessura de sedimentos e possíveis locais para mancha de empréstimo.

Até ao momento, foram consideradas as observações visuais das sondagens marcadas a azul e a laranja, relativas às sondagens da FCUL e da DRAAC¹, respetivamente. Na **Figura 4.5** é possível a visualização da localização de todas as sondagens analisadas até ao momento (ver fotografias em ANEXOS).



Figura 4.5: Localização das sondagens da FCUL e da DRAAC analisadas previamente, a azul e a laranja, respetivamente. Adaptado do relatório LIFE Dunas 2021 -Análise Preliminar dos dados de sondagem na baía de Porto Santo – Espessura de sedimentos e possíveis locais.

¹ Direção Regional do Ambiente e Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

4.1.2.1 AO LARGO (REGIME MÉDIO, MODAL E TEMPORAIS)

A caracterização do clima de agitação marítima recorreu a dados relativos ao clima global, tendo estes sido obtidos através do website *Copernicus* (<https://cds.climate.copernicus.eu/>). Utilizaram-se dados referentes a parâmetros de agitação marítima ERA5 (ERA5 *hourly data on single levels from 1959 to present*, Hersbach and Dee, 2016) que consistem numa reanálise de dados desde 1979 até ao presente. Estes dados são determinados a partir de cálculos estatísticos que estimam as condições do clima do passado, através de uma malha regular de 0.5° de intervalo em latitude e longitude.

A obtenção dos dados referentes à área em estudo em específico, foi escolhida uma posição para representar a agitação ao largo que neste caso correspondeu à posição latitude e longitude, 32.8° e -16.5°, respetivamente (**Figura 4.6**). Os parâmetros² analisados foram o Hs (em metros), o Tp (em segundos) e a direção média (em graus).

Para a analisar os dados referentes à agitação marítima, foi utilizado um *script* no *software Python*, que utiliza funções de programação orientada a objetos, nomeadamente o objeto *WaveTimeSeries* concebido pelo Professor Rui Taborda (disponível em <https://github.com/disepla/WaveTools>). O objeto *WaveTimeSeries* inclui um conjunto de funções que auxiliam a gestão e a análise séries temporais de dados de agitação marítima. Por sua vez, o *script* utiliza o objeto *WaveTimeSeries* para calcular as estatísticas gerais (Hs, Tp, Tm e Direção) da série temporal (incluindo percentis de distribuição) e dos parâmetros de ondas, inclusive estatísticas gerais dos temporais marítimos ocorridos.

O critério de temporal considerado neste trabalho estabelece que o temporal inicia quando o Hs das ondas ultrapassa um valor crítico e termina quando o Hs desce, permanecendo-se abaixo do valor crítico durante pelo menos 24h (Silva et al., 2013 e Silva e Taborda, 2014). No caso de Porto Santo, o Hs considerado para o valor crítico é de 5.15m (Andrade et al., 2017).

Foram também analisadas as estatísticas gerais dos parâmetros de direção, período e altura significativa das ondas.

² Referências Era5: swH - *significant height of combined wind waves and swell* (altura significativa); pp1d - *peak wave period* (período de pico); mwd - *mean direction* (direção média)

4.1.2.2 JUNTO À COSTA

De forma a caracterizar a agitação marítima junto à costa, procedeu-se à propagação da agitação marítima do largo (ERA 5) para a baía de Porto Santo utilizando o modelo *SWAN (SWAN Cycle III version 40.51)*, um modelo de propagação de ondas utilizado para obter estimativas de ondas em zonas costeiras.

O modelo correu em modo estacionário sobre uma malha batimétrica regional e uma malha batimétrica local (**Figura 4.6**). Os dados da batimetria regional foram obtidos através da compilação e interpolação de dados obtidos pelo GEBCO, sendo que a extensão da malha é de 52 x 53 km e a resolução de 1km. Enquanto a malha local foi obtida através da carta batimétrica da ilha do Porto Santo e tem uma extensão de 29.5 x 26 km e uma resolução de 100 m (IH, 2001).

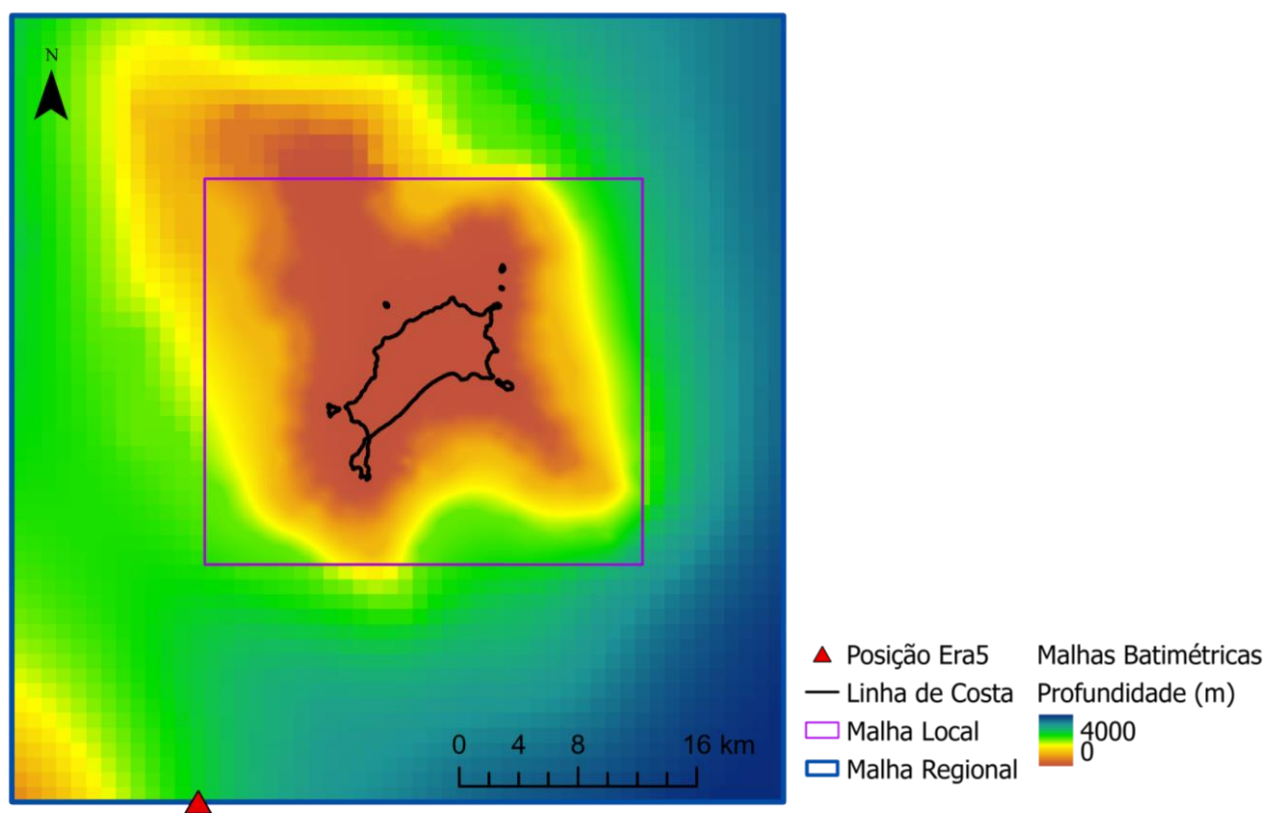


Figura 4.6: Malhas batimétricas utilizadas e posição do ponto Era5 utilizado.

A discretização de direção de ondas foi dividida em 24 classes e consideradas 24 classes de frequência. Os processos associados a *whitecapping* e interações quadruplas de ondas foram desativados.

Através dos valores obtidos na leitura do *WaveTimeSeries* e dos valores médios considerados em Andrade et al. (2017), foram definidas as condições de fronteira (*Boundary Conditions*) no *SWAN*. O *SWAN* força a que todas as ondas a entrar na malha, independentemente das suas características (direção, Hs e Tp), entrem com os valores definidos nas condições de barreira.

Por fim, foram definidos os seguintes parâmetros de saída a serem exportados: Hs, Tp e Urms. Posteriormente, realizou-se o mapeamento dos resultados em ambiente GIS.

4.1.3 LIMITES MORFOLÓGICOS DA PLATAFORMA INSULAR

4.1.3.1 CRITÉRIOS GEOMORFOLÓGICOS

A plataforma insular é definida por limites morfológicos, estes limites referem-se às características geológicas que definem a extensão e os limites físicos da ilha. Os limites da plataforma são dinâmicos e sujeitos a mudanças ao longo do tempo, por isso, é importante que estes sejam calculados tendo em conta os critérios geomorfológicos existentes. Os critérios geomorfológicos definidos para a plataforma insular incluem as h_c , de h_{in} (porção mais próxima da costa na plataforma continental e é caracterizada por águas relativamente rasas), h_{mid} (zona intermédia da plataforma continental, que é a extensão da massa terrestre submersa sob o oceano) e de w_b (profundidade na coluna de água onde a energia das ondas afeta significativamente as partículas de água).

Na **Figura 4.7** é possível observar o modelo conceptual utilizado por Bosnic (2017) para a definição dos critérios geomorfológicos da plataforma, onde as referências altimétricas neste trabalho associam-se a condições de energia moderada (ME) e elevada (HE).

Para o calculo destes valores para a ilha do Porto Santo foi considerado o valor de h_c a 4.5 m de profundidade (Andrade et al., 2017), que segue a formulação empírica de Hellermeier (1978). Esta formulação indica que a h_c é igual a 2 vezes a média da altura significativa mais 11 vezes o desvio-padrão.

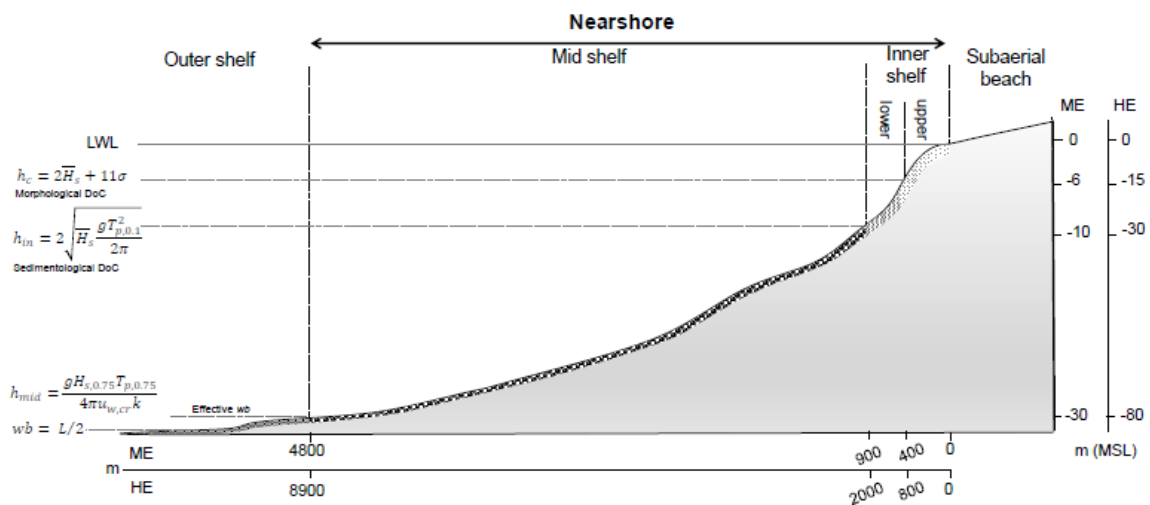


Figura 4.7: Modelo conceptual utilizado para a definição dos critérios geomorfológicos da plataforma, adaptado de Bosnic (2017).

A h_{in} corresponde à zona onde ocorrem as trocas sedimentares entre os domínios continentais e oceânicos. Nesta região os sedimentos encontram-se geralmente em equilíbrio com as condições hidrodinâmicas locais, esta região pode ser dividida em plataforma interna superior e inferior (Bosnic, 2017). Segundo o mesmo autor, o cálculo para estimar o limite entre os domínios internos (h_{in}) e intermédios (h_{mid}), teve por base a seguinte equação:

Equação 3.1: Equação utilizada para definir a profundidade do limite *Inner Shelf*.

$$h_{in} = 2 \sqrt{\frac{g T_{p,0.1}^2}{H_s}} \frac{H_s}{2\pi}$$

Em que:

- $T_{p,0.1}$ é o décimo percentil do período de pico em *offshore*;
 - H_s é a altura significativa;
 - g corresponde à aceleração gravítica.

A h_{mid} é a região abaixo do limite de profundidade de fecho que se estende até à plataforma externa (*Outer Shelf*). Nesta região as alterações morfológicas são negligenciáveis, deixando de existir trocas sedimentares arenosas com o domínio interior. Para a determinação do valor da profundidade da h_{mid} foi calculada, primeiramente, a velocidade orbital crítica através da seguinte equação, definida por Hanson e Camenen (2007):

Equação 3.2 Equação utilizada para calcular a velocidade orbital crítica.

$$u_{w,cr} = 0.5 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g \right]^{1.25} D_{50}^{0.75} T^{0.5}}$$

Em que:

- ρ_s é a densidade do sedimento (2650 kg/m³);
- ρ é a densidade do fluido (1025 kg/m³);
- D_{50} é o diâmetro adimensional das partículas (0.000125 m).

Após o cálculo da velocidade circular crítica (**Equação 3.2**) foi possível calcular o valor da profundidade da h_{mid} através da seguinte equação:

Equação 3.3: Equação utilizada para definir a profundidade do limite *Mid Shelf*.

$$h_{mid} = \frac{g H_{s,0.75} T_{p,0.75}}{4\pi u_{w,cr} k}$$

Em que:

- $T_{p,0.75}$ é o 75º percentil do período de pico em *offshore*;
- $H_{s,0.75}$ é o 75º percentil da altura significativa das ondas em *offshore*;
- $u_{w,cr}$ corresponde à velocidade orbital crítica;

- k corresponde à constante empírica, com valor considerado de 1.55.

O contacto com o domínio de plataforma externa, ou *Outer shelf* caracteriza-se pelo limite em que as forças induzidas pelas ondas deixam de conseguir remobiliar sedimentos de fundo, sendo uma profundidade equivalente à w_b (Bosnic, 2017). Neste domínio os sedimentos são essencialmente lodosos. Por fim, para o cálculo da profundidade w_b foi utilizada a seguinte equação, adaptada por Bosnic (2017):

Equação 3.4: Equação utilizada para definir a profundidade de *Wave Base*.

$$W_b = \frac{L}{2}$$

Em que:

- L é o comprimento de onda ($L = 1.56 * T^2 \Leftrightarrow L = 1.56 * (10.9)^2 \Leftrightarrow L = 185.34\text{m}$ (**Tabela 5.9**)).

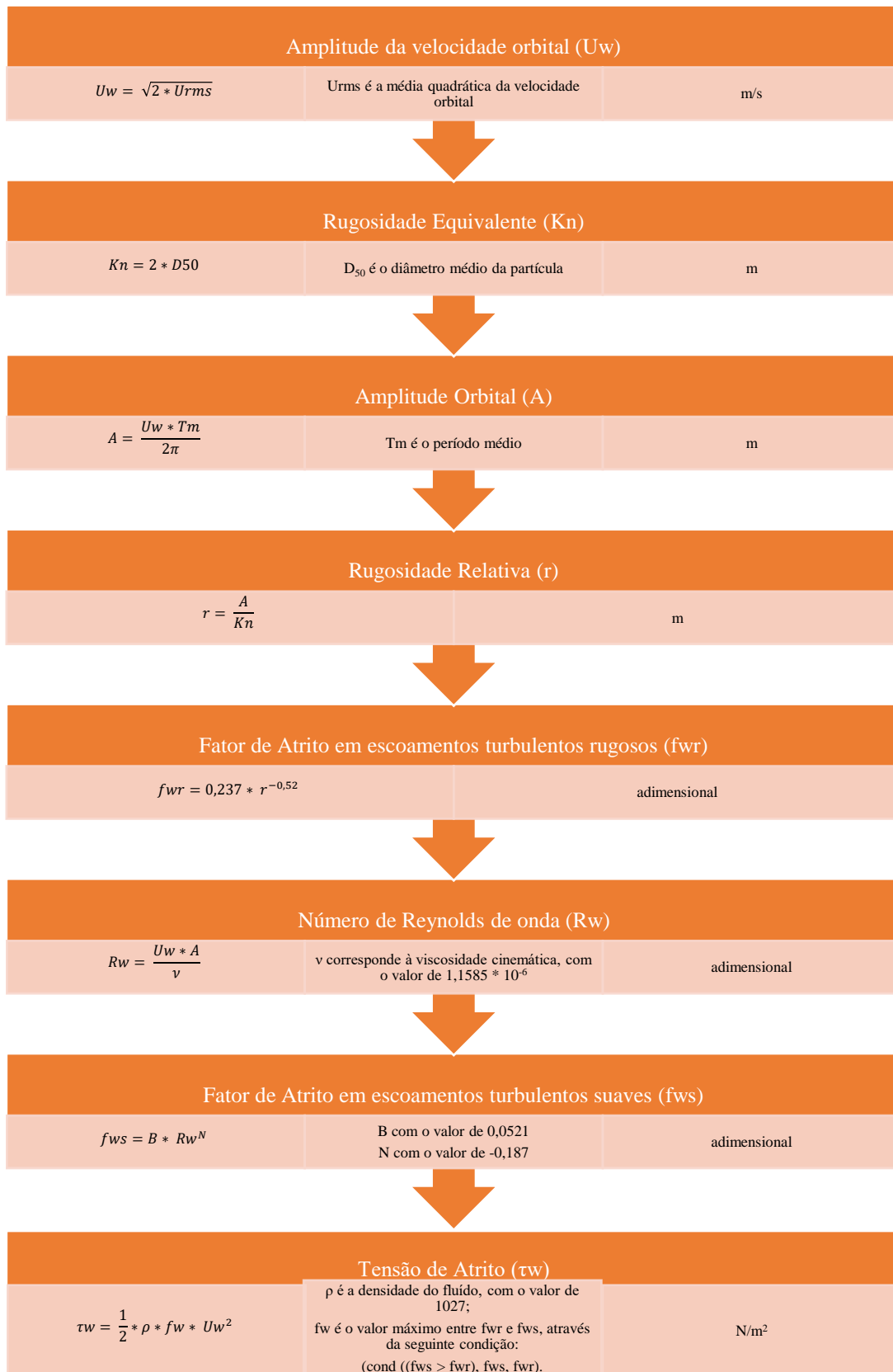
4.1.3.2 MARCAÇÃO DOS LIMITES GEOMORFOLÓGICOS

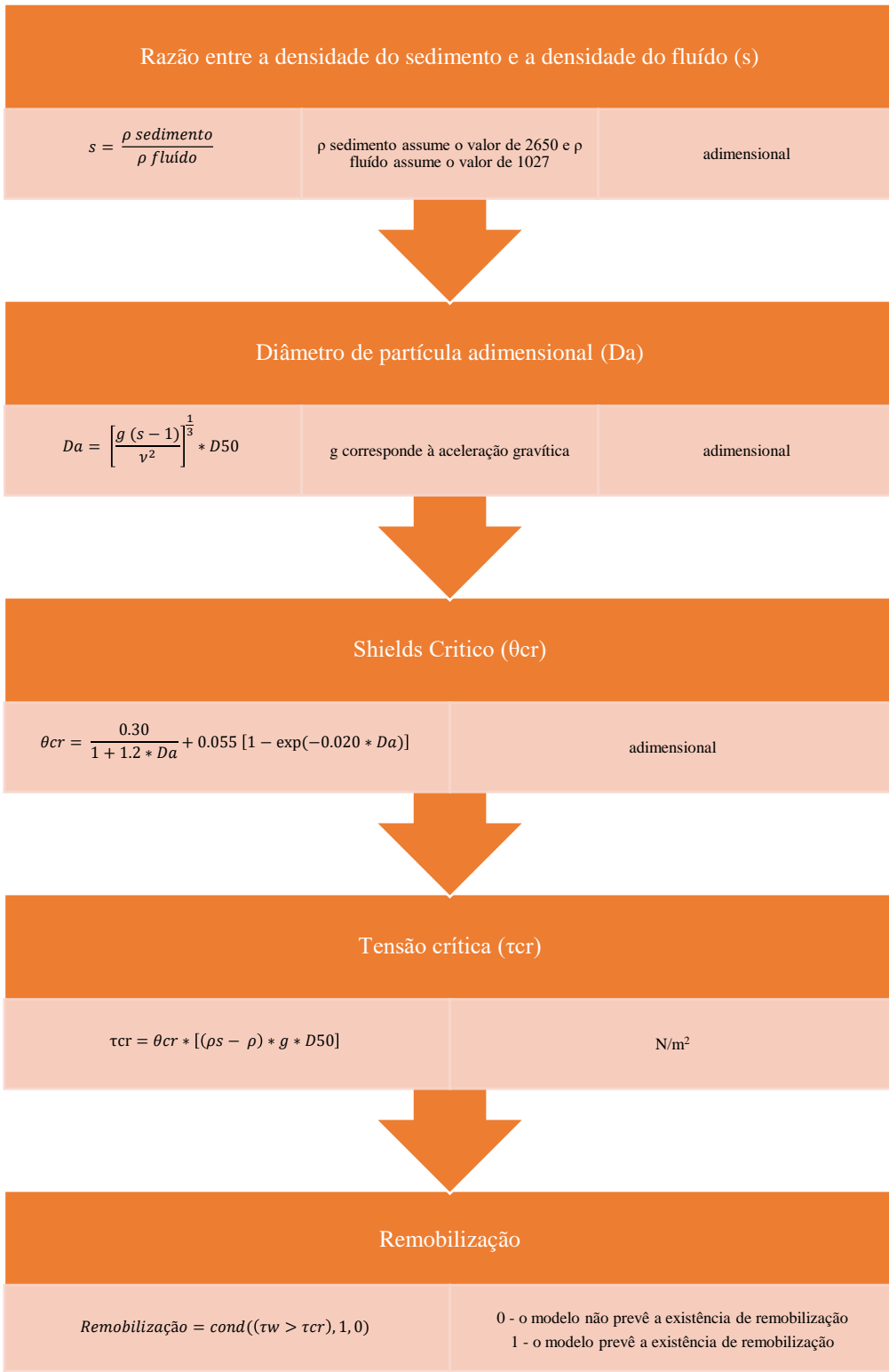
Após a obtenção dos valores dos respetivos limites geomorfológicos da plataforma insular, os limites foram marcados no *software ArcGIS Pro*. Para tal foi utilizada a malha batimétrica usada previamente no *SWAN*. Primeiramente, o esquema de cores para o intervalo batimétrico foi alterado, de forma a tornar a visualização mais intuitiva. Assim a região central da ilha apresenta tons avermelhados e a região oceânica tons azulados. Para melhorar a representação e identificação dos limites geomorfológicos, foram criadas linhas de contorno batimétrico, em ambiente *ArcGIS Pro*, com o valor 0 para a linha de costa, e com os valores h_{in} , h_{mid} e de w_b para os restantes limites.

4.1.4 REMOBILIZAÇÃO SEDIMENTAR

4.1.4.1 CRITÉRIO DE LIMAR DE REMOBILIZAÇÃO SEDIMENTAR

Para o cálculo da remobilização sedimentar foram utilizadas as formulações apresentadas e compiladas em Tabora (2015), que por sua vez se baseia em formulações de Soulsby (1997) segue os seguintes passos:





4.1.4.2 DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA O CÁLCULO DA REMOBILIZAÇÃO SEDIMENTAR

Através do *software ArcGIS Pro*, utilizando o *ModelBuilder*, foi desenvolvido um modelo para o cálculo da remobilização de sedimentos de ondas policromáticas. As ondas policromáticas são geradas por múltiplas ondas com diferentes frequências ou períodos, resultando na obtenção do valor de Urms, proveniente do *SWAN*. Em contrapartida, as ondas monocromáticas consistem em apenas um único tipo de onda com um período específico. Os exemplos aqui demonstrados são mais próximos a uma onda monocromática, no entanto, a vantagem do modelo desenvolvido é a capacidade de utilizar a informação proveniente do *SWAN*, que pode ser bastante mais complexa do que a utilizada. É importante ressaltar que este modelo se foca, exclusivamente, nas características das ondas, não tendo em conta a influência das correntes. Destaca-se ainda que o modelo é versátil, permitindo estimar a remobilização de sedimentos em qualquer local geográfico, desde que os dados de entrada estejam alinhados com a área de interesse desejada. O modelo é ainda capaz de aplicar cálculos de remobilização sedimentar, tendo em consideração parâmetros que variam espacialmente, nomeadamente a dimensão das partículas, o período de pico das ondas e a média quadrática da velocidade orbital. Estes parâmetros podem ser modelados em zonas de plataforma interna utilizando o *SWAN*.

Primeiramente, foram definidas todas as variáveis e os parâmetros necessários para o cálculo (D_{50} , T_p , U_{rms} , v , ρ_s e ρ), ambos a azul. De seguida, através da função *Raster Calculator*, foram criados diferentes *rasters* que seguiram o procedimento acima mencionado. Na **Figura 4.8** é possível observar o fluxograma que descreve os cálculos e procedimentos do modelo. O raster final, denominado de “Remobilização” prevê a existência ou não de remobilização, ou seja, quando a tensão de atrito no fundo (τ_w) é superior à tensão crítica efetiva (τ_{cr}) é prevista a ocorrência de remobilização, ao par que quando a tensão de atrito no fundo é inferior à tensão efetiva não é prevista a ocorrência de remobilização.



Figura 4.8: Fluxograma referente ao procedimento do modelo.

De forma a utilizar o modelo criado para diferentes dados, através do *software ArcGIS Pro*, é necessário abrir a ferramenta Cálculo da Remobilização de Sedimentos de Ondas Policromáticas. Devem ser inseridos os *rasters* correspondentes ao D_{50} , ao T_m e ao U_{rms} . De seguida, indicar os valores de v , de ρ_s e de ρ , respetivamente, caso estes sejam diferentes dos estabelecidos. Na secção Remobilização (*Output*), deve ser indicado o nome e a localização do ficheiro final. Por fim, através do botão *Run*, inicia-se o processo (**Figura 4.9**).

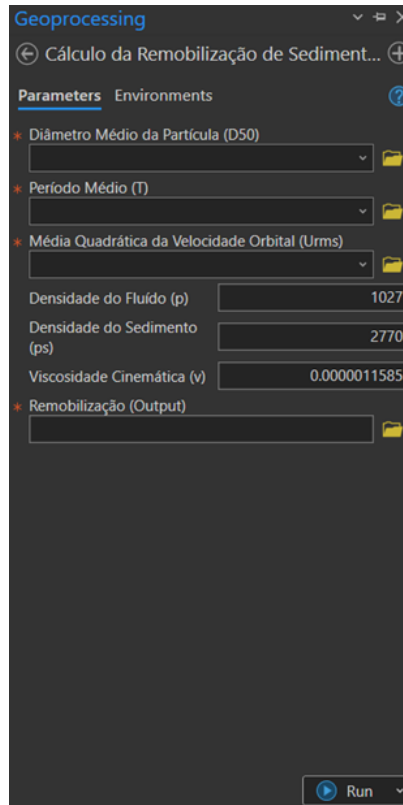


Figura 4.9: Ferramenta gerada através do modelo criado para o Cálculo da Remobilização de Sedimentos de Ondas Policromáticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTAR DA PLATAFORMA INSULAR DE PORTO SANTO

Após a análise granulométrica é possível constatar que todas as amostras correspondem a areias finas, com exceção da amostra Perfil W001 Face de Praia, sendo esta a mais grosseira, como é possível observar segundo os valores de D_{50} , presentes na **Tabela 5.1**. Relativamente à calibração das areias, as amostras Perfil W001 Face de Praia, Perfil W002 Berma, Perfil W003 Duna e Perfil W AM10 são entre bem a muito bem calibradas, enquanto as restantes amostras são moderadamente calibradas.

Tabela 5.1: Distribuição granulométrica pelo Método Folk & Ward e respetivas percentagens de areia das amostras analisadas do perfil W, gerada através do Gradistat.

Método de Folk & Ward (Φ)								
	Perfil W001 Face Praia	Perfil W002 Berma	Perfil W003 Duna	Perfil W AM6 1/2	Perfil W AM7 1/2	Perfil W AM8	Perfil W AM9	Perfil W AM10
Média	Areia Média	Areia Fina	Areia Fina	Areia Fina	Areia Fina	Areia Fina	Areia Fina	Areia Fina
Desvio Padrão	Bem calibrada	Muito bem calibrada	Muito bem calibrada	Moderadamente bem calibrada	Moderadamente calibrada	Moderadamente bem calibrada	Moderadamente bem calibrada	Bem calibrada
D_{50} (Φ)	1.776	2.155	2.271	2.336	2.334	2.324	2.141	2.148
Areia Muito Grosseira (%)	0.2%	0.0%	0.0%	2.2%	2.5%	0.6%	0.4%	0.2%
Areia Grosseira (%)	4.0%	0.2%	0.0%	2.0%	2.1%	1.8%	2.5%	1.2%
Areia Média (%)	69.5%	30.1%	13.2%	22.8%	21.7%	23.4%	36.0%	35.0%
Areia Fina (%)	26.2%	69.5%	86.2%	60.1%	60.3%	66.7%	57.4%	61.1%
Areia Muito Fina (%)	0.0%	0.2%	0.5%	10.0%	9.9%	7.2%	3.5%	2.4%
Areia total (%)	100.0%	100.0%	100.0%	96.9%	96.6%	99.6%	99.8%	99.9%

Quanto ao diâmetro das partículas, é possível observar na **Figura 5.1** que no caso da amostra P. Santo Perfil W001 Face de Praia, a maioria dos sedimentos apresentam um diâmetro de partículas que varia entre 1.5ϕ e 2.5ϕ , por isso um diâmetro relativamente maior, enquanto nas restantes amostras a grande maioria dos sedimentos apresentam um diâmetro de partículas que varia entre 1ϕ e 3ϕ , por isso um diâmetro menor.

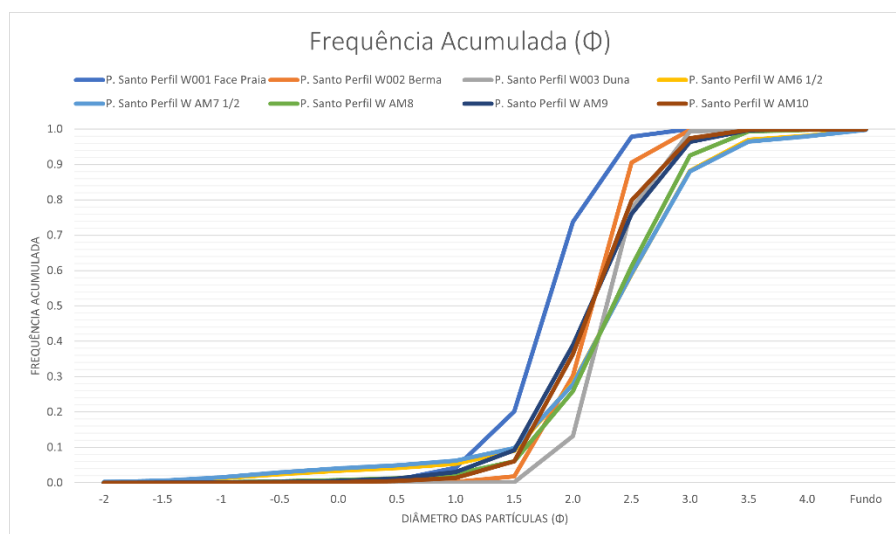


Figura 5.1: Gráfico representativo da frequência acumulada, em ϕ , das amostras analisados perfil W.

Tendo como meio de comparação os valores de D_{50} obtidos pelo IH (2001), é possível observar que existe alguma variabilidade da cobertura sedimentar da plataforma do Porto Santo, sendo que as amostras recolhidas pelo IH tendem a ser mais grosseiras do que as recolhidas pela FCUL.

Assim sendo, constata-se pelos valores da **Tabela 5.2** que os diâmetros obtidos pelo IH variam entre os 2.2Φ e 1.7Φ , com uma média a rondar os 1.94Φ . Relativamente análise efetuada pela FCUL, os resultados variam entre os 2.5Φ e 1.4Φ , sendo que a média ronda os 2.19Φ . Quando comparadas as duas análises, é possível observar algumas discrepâncias, no entanto, não são extremamente elevadas, uma vez que, ambas as análises se situam na granulometria referente às areias médias e finas (**Figura 5.2**).

Tabela 5.2: Comparação de valores de D_{50} entre a análise efetuada pelo IH e a análise efetuada pela FCUL.

Estacao	$D_{50_FCUL_phi}$	$D_{50_IH_phi}$
UL E1	2.12	1.86
UL E2	2.23	1.91
UL E3	2.2	1.96
UL E4	2.29	2.08
UL E10	2.58	2.28
DRAAC E5	1.41	1.90
DRAAC E6	2.14	1.89
DRAAC E7	2.19	1.98
DRAAC E8	2.16	2.00
Perfil W AM6	2.34	1.75
Perfil W AM7	2.33	1.80
Perfil W AM8	2.32	1.88
Perfil W AM9	2.14	1.92

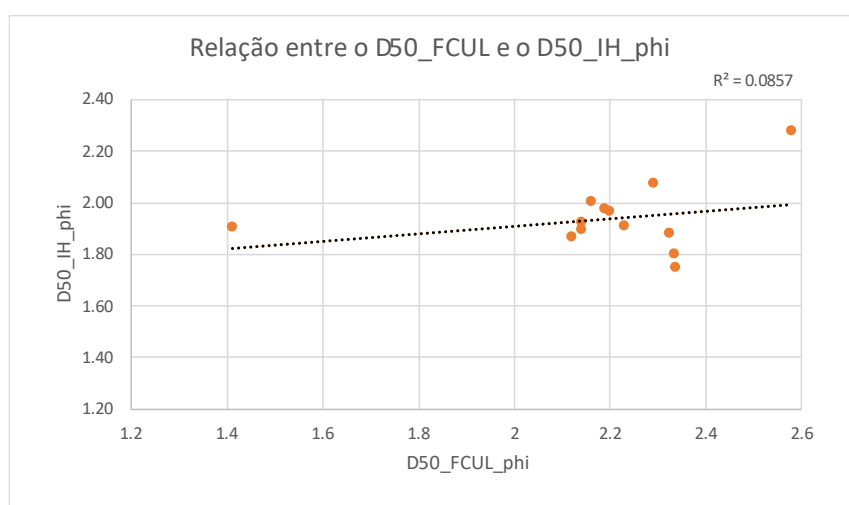


Figura 5.2: Gráfico referente à relação entre o D_{50_FCUL} e o D_{50_IH} .

Após a análise e comparação da **Tabela 5.2** referente à distribuição granulométrica na baía do Porto Santo, é possível observar que a distribuição granulométrica efetuada pelo IH é, na generalidade, mais grosseira que a efetuada pela FCUL. Não obstante, a discrepância existente não deve ser considerada significativa uma vez que ambas se encontram inseridas na classe granulométrica referente às areias médias e finas. Os principais motivos para a existência desta diferença podem ser a diferente sazonalidade aquando da recolha das amostras e a profundidade de recolha das amostras, isto porque as sondagens recolhidas pela FCUL compreenderam uma maior profundidade do que as sondagens do IH.

5.2 FORÇAMENTO OCEANOGRÁFICO

5.2.1 OFFSHORE

Os resultados obtidos através da leitura do objeto *WaveTimeSeries* foram expressos em diversos gráficos com as respectivas variáveis necessárias à análise a efetuar. Relativamente aos resultados obtidos para toda a escala temporal, entre 1979 e 2021, é possível observar uma grande variação da altura significativa e do período de pico com evidente sinal sazonal. Relativamente à altura significativa os valores variam entre um máximo de cerca de 8.5 m, associados ao inverno e um mínimo de cerca de 0.6 m, associados ao verão. O período de pico apresenta um máximo um pouco superior a 21 s, associados ao inverno e um mínimo com cerca de 3.7 s, associados ao verão (**Figura 5.3**). Na figura não constam os dados da direção média, uma vez que, não é possível distinguir os valores.

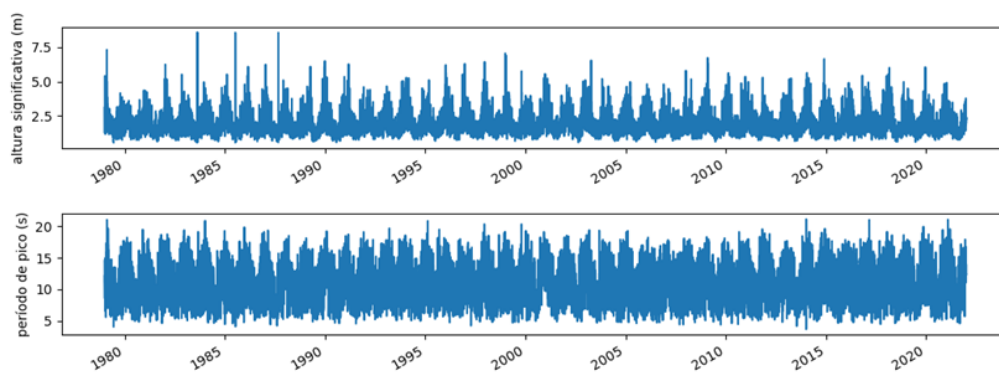


Figura 5.3: Gráfico correspondente à variação da altura significativa, período de pico e direção média ao longo da escala temporal utilizada.

Através da leitura do objeto *WaveTimeSeries*, foi também possível identificar 4 cenários predominantes que ocorrem na baía, como é possível observar na **Figura 5.4**. Os valores associados a estes 4 cenários encontram-se mencionados previamente na **Tabela 5.3**.

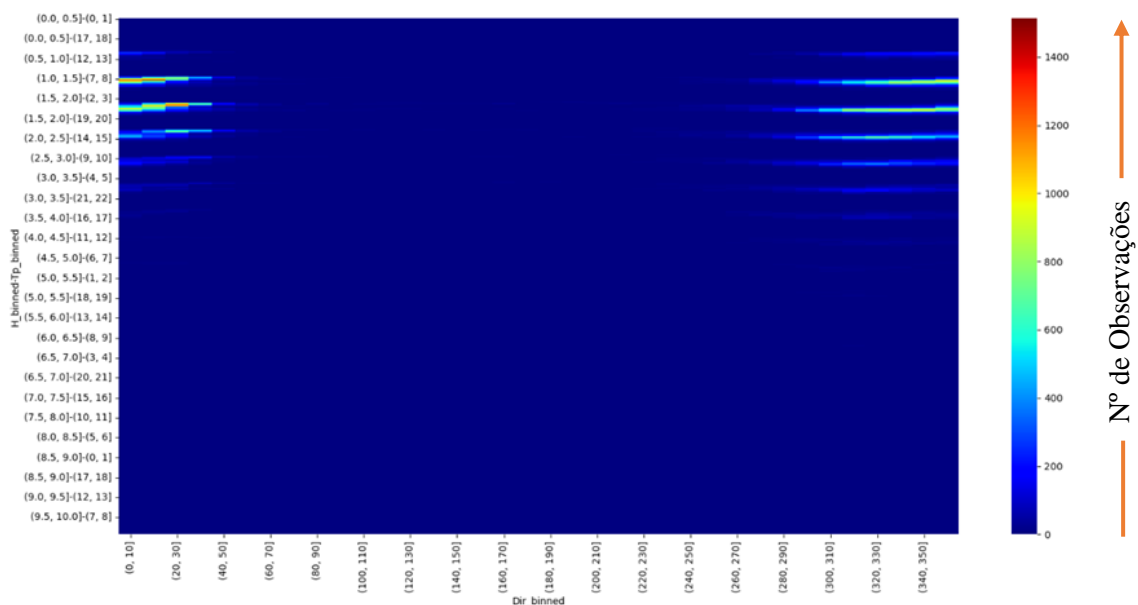


Figura 5.4: Gráfico resultante da leitura do objeto *WaveTimeSeries*, com os 4 cenários predominantes.

Tabela 5.3: Cenários predominantes considerados para o cálculo das diferentes remobilizações.

	Direção (°)	Período (s)	Altura Significativa (m)
Remobilização 1	25	9	1.5
Remobilização 2	25	9	2.5
Remobilização 3	345	12	1.5
Remobilização 4	345	12	2.5

A agitação marítima ao largo predominantemente é de NW, os valores médios da altura significativa ao largo da área de estudo são predominantes no intervalo entre 1.29 m e 2.57 m e o período médio na área em estudo é predominante nos intervalos entre 6.9 s -9.1 s e 9.1 s -11.4 s. Ao contrário do que acontece com a altura significativa existe alguma abundância de valores de período médio elevados. Por fim, o período de pico é mais frequente na área em estudo é nos intervalos entre 9.4-12.6 s e 12.6-15.7 s. Assim como o período médio existe alguma abundância de valores de período médio elevados (**Figura 5.5**).

Relativamente aos valores obtidos para os temporais é possível observar uma grande variação de todas

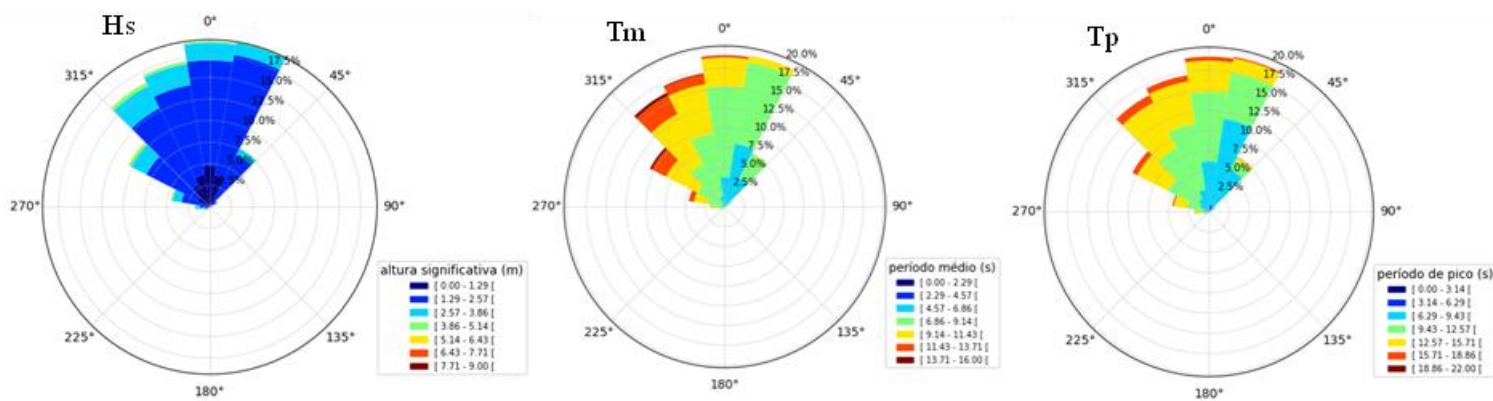


Figura 5.5: Variação dos valores médios da altura significativa, período médio e período de pico, ao largo da área de estudo.

as variáveis associadas (altura significativa, período médio, período de pico e direção média) (**Figura 5.6**).

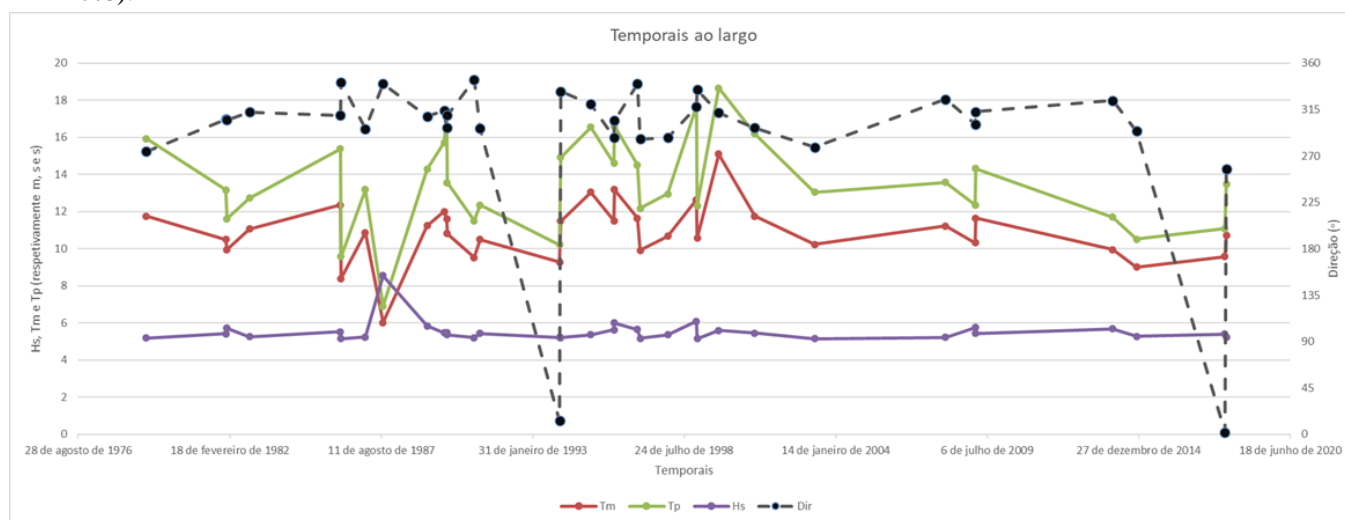


Figura 5.6: Gráfico correspondente à variação da altura significativa, período médio, período de pico e direção média ao longo da escala temporal utilizada referente a temporais.

Por forma a interpretar um temporal com valores mais dispares foram gerados gráficos específicos. O temporal selecionado para o caso foi o de 2 de setembro de 1987, com duração de 27 dias (**Tabela 5.5**). Na **Figura 5.7**, é possível observar que a agitação marítima ao largo para o temporal selecionado é predominantemente de NNW. A altura significativa passa a estar inserida em intervalos superiores, sendo possível observar o intervalo máximo entre 7.71 m e 9 m. O período médio apresenta também o intervalo máximo entre 13.7 s e 16 s, desta feita com menos abundância. Por fim, o período de pico, à semelhança dos restantes parâmetros de agitação, apresenta o intervalo máximo entre 13.7 s e 16 s.

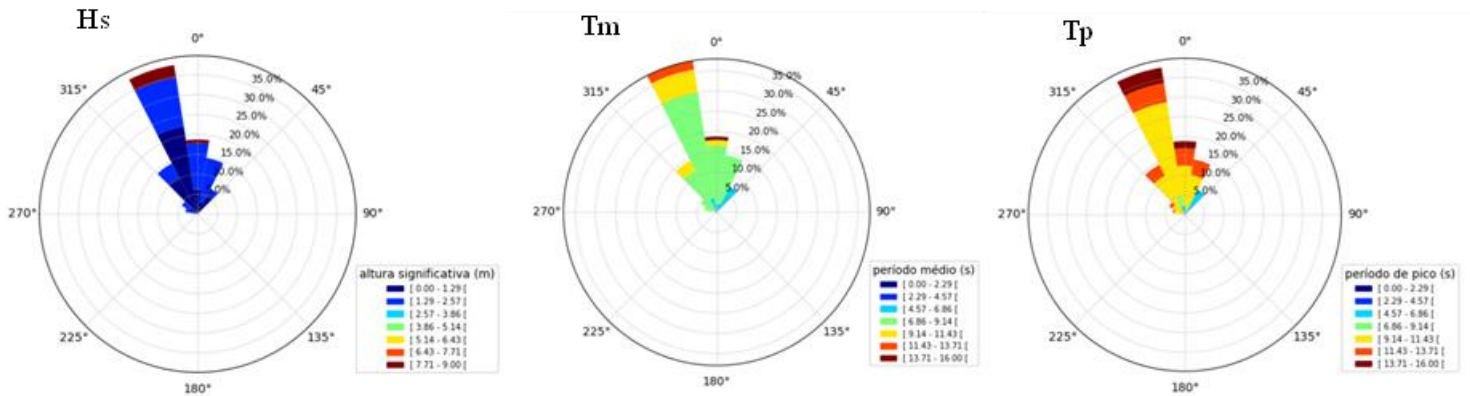


Figura 5.7: Variação dos valores médios da altura significativa, período médio e período de pico, na área em estudo, para o temporal de 2 de setembro de 1987.

Para o cálculo dos critérios geomorfológicos da plataforma insular foram utilizadas as estatísticas obtidas para a série temporal, sendo estas observadas na **Tabela 5.4**.

Tabela 5.4: Tabela correspondente às estatísticas obtidas para a série temporal geral.

	Direção (°)	Período Médio (s)	Período de Pico (s)	Altura Significativa (m)
Média	347	8.5	10.9	1.91
Desvio-Padrão	150	2.8	2.7	0.73
Mínimo	0	4.8	3.7	0.58
Percentil 25	22	7.1	8.6	1.39
Percentil 50	303	8.2	11.0	1.77
Percentil 75	334	9.6	12.9	2.27
Máximo	360	15.5	21.1	8.57

Com base no critério temporal adotado, foram identificadas 34 ocorrências de temporais ao longo da série temporal, como se constata na **Tabela 5.5**. Foi calculada a média das direções, do Tp e do Hs, para cada temporal, bem como para a totalidade dos temporais. Os valores médios obtidos foram de 309°, 12.3 s e 5.37 m, respetivamente. Tendo em conta os valores médios calculados, é possível observar que o temporal mais elevado corresponde ao de 2 de setembro de 1987, com uma duração de 27 horas e uma altura significativa constante de 8.55 m. Por outro lado, o temporal que ocorreu a 28 de dezembro de 1981 apresentou uma duração maior que os restantes, totalizando 54 horas, no entanto, apresenta variações de altura significativa, oscilando entre 5.43 m e 5.81 m, e um período de pico de 13.2 s. Portanto, embora tenha uma duração notável, não é considerado elevado quando comparado com o de 2 de setembro de 1987.

Tabela 5.5: Tabela correspondente às ocorrências de temporais ao longo da sequência temporal com a respetiva média das variáveis em causa.

Ocorrências	Direção (°)	Período Médio (s)	Período de Pico (s)	Altura Significativa (m)	Duração (h)	Altura significativa Máxima (m)
10 de fevereiro de 1979	274	11.8	15.9	5.20	36	8.34
28 de dezembro de 1981	306	10.5	13.2	5.43	54	5.81
11 de janeiro de 1982	305	10.0	11.6	5.73	27	7.26
7 de novembro de 1982	312	11.1	12.7	5.27	27	6.39
16 de fevereiro de 1986	310	12.4	15.4	5.53	36	6.42
27 de fevereiro de 1986	342	8.4	9.6	5.15	30	6.58
13 de janeiro de 1987	296	10.9	13.2	5.24	24	7.19
2 de setembro de 1987	340	6.0	6.9	8.55	27	8.55
8 de abril de 1989	308	11.2	14.3	5.84	30	6.97
19 de novembro de 1989	314	12.0	15.7	5.48	30	5.91
25 de dezembro de 1989	297	11.6	17.1	5.47	24	5.93
28 de dezembro de 1989	309	10.8	13.6	5.36	30	6.89
19 de dezembro de 1990	344	9.5	11.5	5.21	30	5.94
6 de março de 1991	297	10.5	12.4	5.43	30	7.08
20 de janeiro de 1994	13	9.3	10.2	5.22	30	5.95
4 de fevereiro de 1994	333	11.5	14.9	5.21	33	5.81
10 de março de 1995	320	13.0	16.6	5.37	33	5.80
8 de janeiro de 1996	288	11.5	14.6	5.63	33	6.55
14 de janeiro de 1996	304	13.2	16.6	6.01	36	6.31
12 de novembro de 1996	340	11.6	14.5	5.65	30	6.51
20 de dezembro de 1996	286	9.9	12.2	5.17	48	6.58
18 de dezembro de 1997	288	10.7	13.0	5.36	39	7.15
29 de dezembro de 1998	318	12.6	17.7	6.10	33	8.15
11 de janeiro de 1999	334	10.6	12.3	5.16	36	7.79
22 de outubro de 1999	312	15.1	18.7	5.59	33	6.50
7 de fevereiro de 2001	297	11.7	16.2	5.46	27	5.91
13 de abril de 2003	279	10.2	13.1	5.16	42	7.21
3 de janeiro de 2008	325	11.2	13.6	5.22	27	6.89
1 de fevereiro de 2009	301	10.3	12.4	5.76	33	7.44
4 de fevereiro de 2009	313	11.6	14.3	5.43	27	7.63
17 de janeiro de 2014	324	10.0	11.7	5.68	24	6.66
27 de novembro de 2014	294	9.0	10.5	5.28	51	7.26
7 de fevereiro de 2018	2	9.6	11.1	5.40	24	6.28
28 de fevereiro de 2018	257	10.7	13.5	5.23	24	6.19
Média	309		12.2	5.37	32.29411765	6.76

O forçamento oceanográfico *offshore* teve em consideração os valores de toda a escala temporal, bem como os valores referentes ao episódio de temporal mais significativo. A predominância da direção NNW é visível em ambas as situações, no entanto os valores referentes à altura significativa e ao período médio apresentam algumas discrepâncias, com predominância de valores mais elevados tanto de altura significativa como de período médio para o episódio de temporal mais significativo. Era de prever que a direção predominante em ambas as situações fossem semelhantes uma vez que as variações das direções em toda a escala temporal foram pouco significantes, ao contrário das variações da altura significativa e do período médio que tiveram um comportamento bastante oscilatório ao longo de toda a escala temporal, indicando assim suscetibilidade de valores em condições diferentes.

5.2.2 JUNTO À COSTA

Após a caracterização da agitação marítima dos 4 cenários predominantemente mencionados procedeu-se ao mapeamento dos resultados em ambiente *GIS*. Os resultados obtidos indicam valores de direção, altura significativa e período médio. No que diz respeito aos resultados obtidos para as direções junto à costa, nos cenários 1 e 2 existe uma notável semelhança entre ambos, enquanto os cenários 3 e 4 são idênticos entre si. Junto à costa, nos cenários 1 e 2, a direção predominante varia entre os 45° e os 90°. Por outro lado nos cenários 3 e 4, existe a influência de várias direções, nomeadamente, entre os 45° e os 180°, verificando-se uma maior variabilidade da direção das ondas ao longo da baía, como é possível observar na **Figura 5.8**.

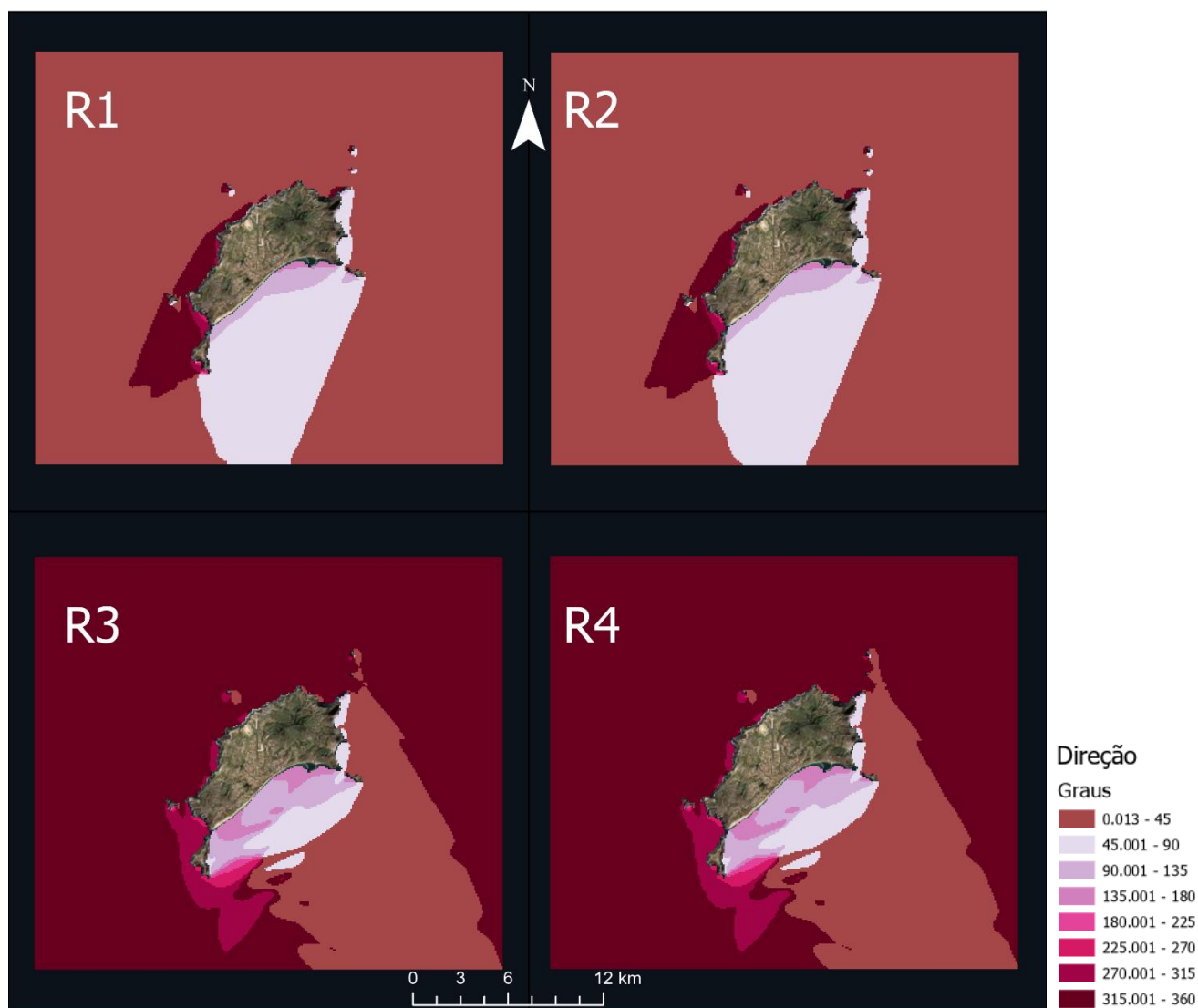


Figura 5.8: Variabilidade da direção das ondas ao longo da baía, tendo em conta os cenários predominantemente mencionados. A direção 1 é referente ao cenário 1, a direção 2 ao cenário 2, a direção 3 ao cenário 3 e, por fim, a direção 4 ao cenário 4.

Relativamente aos resultados obtidos para o Hs, é evidente na **Figura 5.9** que nos cenários 1 e 2 os resultados são congruentes, caracterizados por valores relativamente baixos junto à costa, cerca de 0.1 m, havendo uma mudança significativa de Hs da região *offshore* (1.6 m e 2.5 m, para o cenário 1 e para o cenário 2, respetivamente) para a região junto à costa, demonstrando a influência dos ilhéus adjacentes. É ainda possível observar que na baía a variação tem um gradiente de energia de NE para SW, ou seja, o Hs tende a aumentar nessa direção. O mesmo acontece com os cenários 3 e 4, não obstante, no cenário 3 é possível observar uma notável flutuação tanto de valores mais baixos como de valores mais elevados junto à costa, sendo possível observar também um gradiente de energia de E para W.

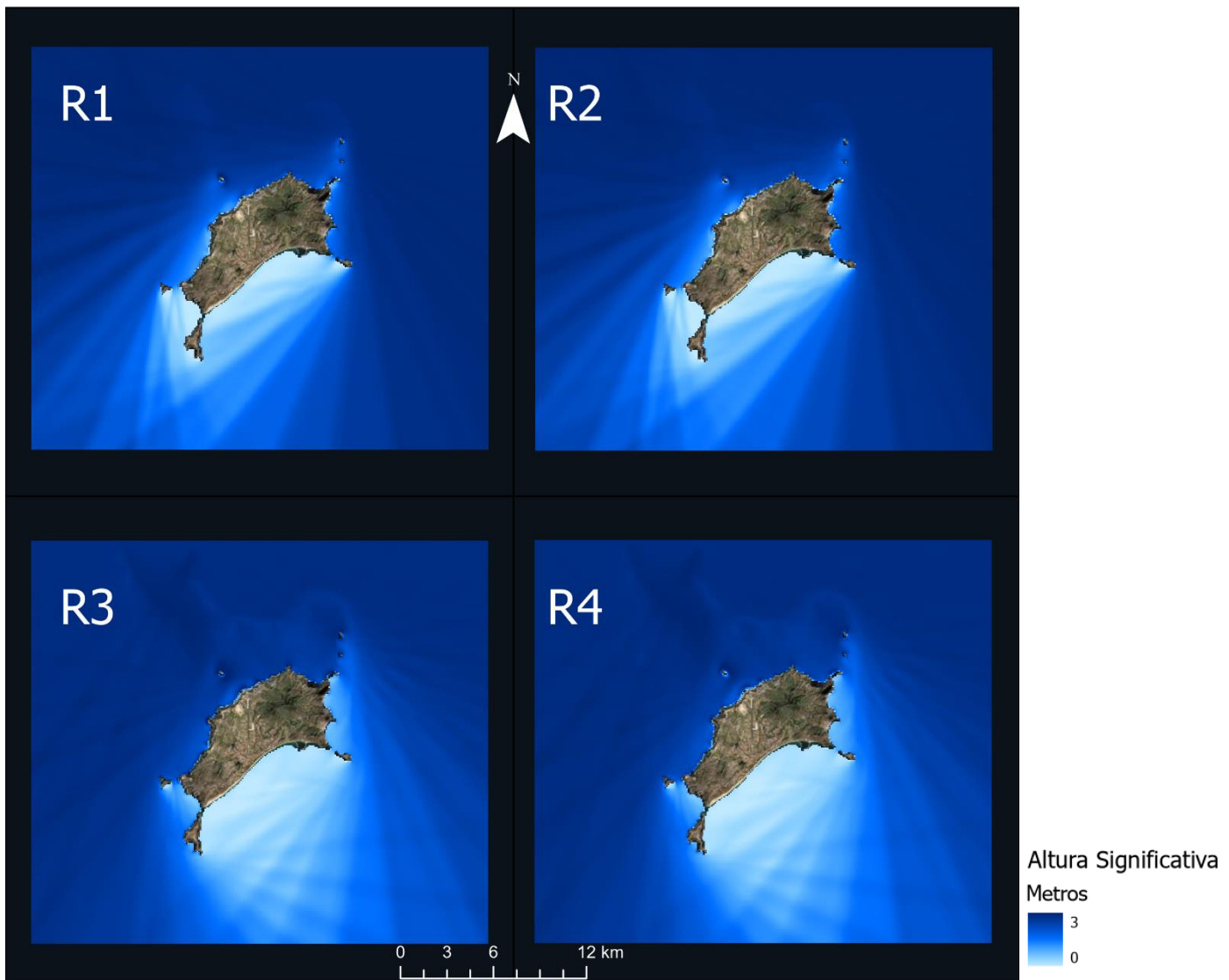


Figura 5.9: Variabilidade do Hs das ondas ao longo da baía, tendo em conta os cenários predominantes. O Hs 1 é referente ao cenário 1, o Hs 2 ao cenário 2, o Hs 3 ao cenário 3 e, por fim, o Hs 4 ao cenário 4.

Por fim, os resultados relativos ao Tm assemelham-se aos obtidos para o Hs, como é possível observar na **Figura 5.10**. Os resultados do Tm referente aos cenários 1 e 2 são bastante semelhantes, sendo que os valores predominantes junto à costa são mais baixos que nos cenários 3 e 4. No entanto, nos cenários 3 e 4 existe uma notável diferença entre valores baixos e valores altos.

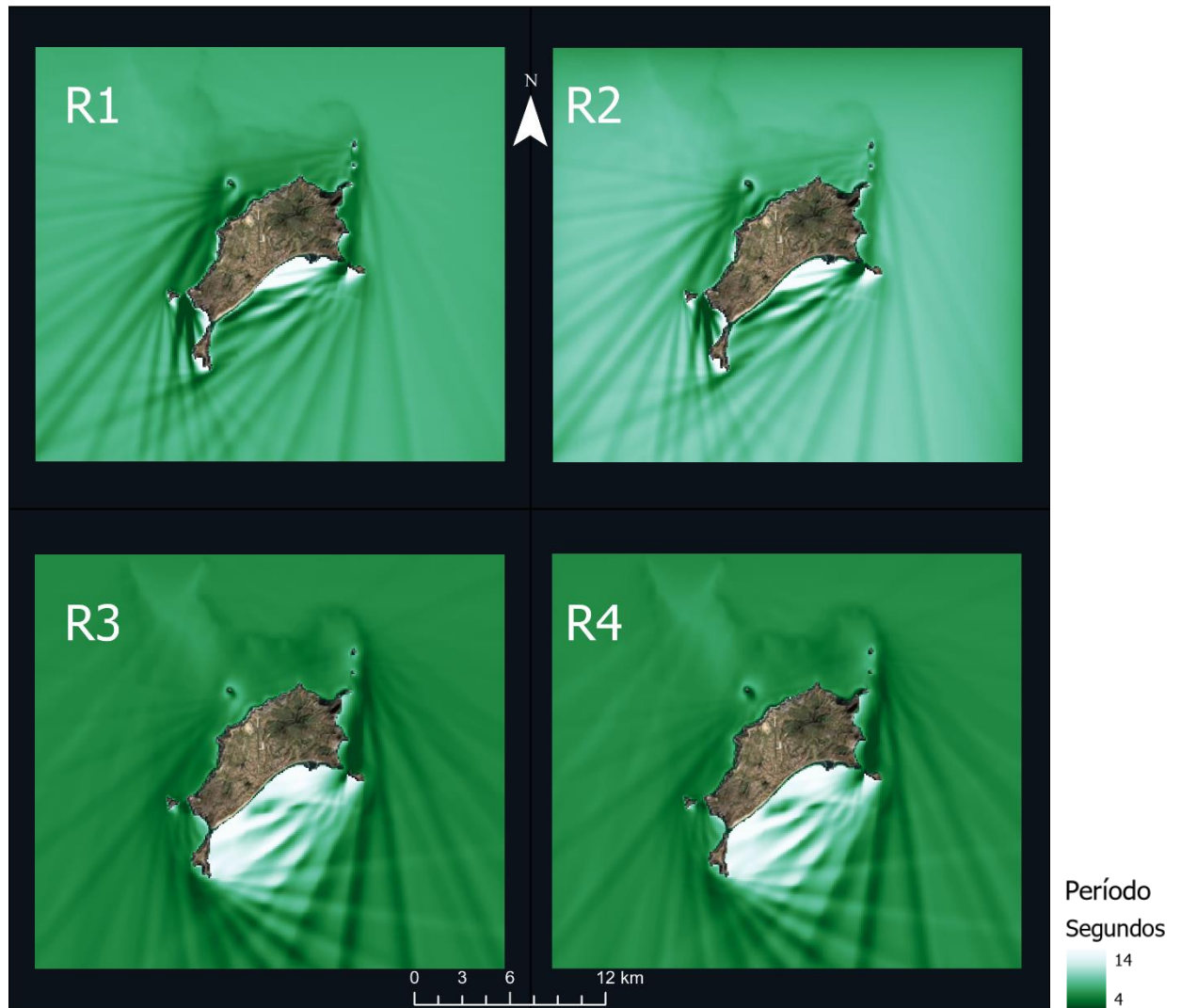


Figura 5.10: Variabilidade do Tm das ondas ao longo da baía, tendo em conta os cenários predominantes. O Tm 1 é referente ao cenário 1, o Tm 2 ao cenário 2, o Tm 3 ao cenário 3 e, por fim, o Tm 4 ao cenário 4.

Para a análise do forçamento oceanográfico junto à costa foram tidos em consideração os 4 cenários predominantes que ocorrem na baía. Para isso, foram analisados individualmente cada variável – direção, Hs e Tm. No caso da direção, nos cenários 3 e 4 existe uma enorme variabilidade de direções das ondas ao longo de toda a baía, enquanto nos cenários 1 e 2 a direção das ondas mantém-se estável. No que diz respeito ao Hs, apenas o cenário 3 se apresenta distinto dos restantes, apresentando uma grande variabilidade ao longo da baía. Por fim, os mapas referentes ao Tm são semelhantes aos mapas da direção, nos cenários 3 e 4 é possível observar que o período apresenta valores mais elevados enquanto nos cenários 1 e 2 existe uma variabilidade de valores maior.

Através dos 4 cenários foram, selecionados 3 pontos ao longo da baía, de forma a caracterizar o regime junto à costa, como é possível observar na **Figura 5.11**. Ambos os pontos se encontram a uma profundidade de 10 m e englobam os parâmetros de agitação marítima, nomeadamente, a direção, a altura significativa e o período médio.

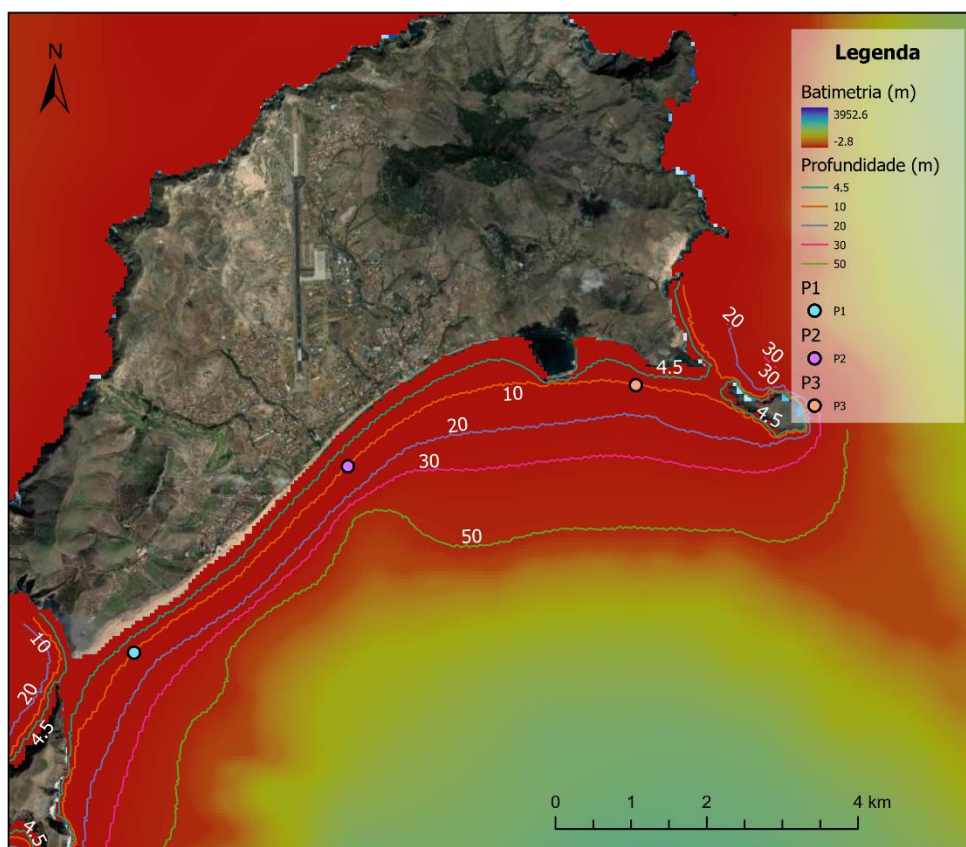


Figura 5.11: Mapa representativo dos 3 pontos à mesma profundidade (10 m) junto à baía para determinação dos parâmetros de direção, altura significativa e período médio.

Por fim, foi gerada uma tabela com os valores referentes a cada parâmetro da agitação marítima para cada ponto selecionado, como é possível observar na **Tabela 5.6**. Com a colocação dos 3 pontos à mesma profundidade é possível identificar as diferenças existentes em cada parâmetro de cada cenário predominante.

Tabela 5.6: Valores referentes a cada parâmetro da agitação marítima para cada ponto selecionado.

	R1			R2			R3			R4		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Direção (°)	100	116	145	100	117	144	142	126	141	154	126	142
Hs (m)	0.4	0.4	0.43	0.24	0.24	0.27	0.12	0.17	0.18	0.3	0.28	0.19
Tm (s)	7.2	8.8	8.1	7	8.7	8.3	12.9	12.1	11.4	11.5	12.1	12.8

Os parâmetros analisados para cada ponto selecionado são todos idênticos entre si.

5.2.3 LIMITES MORFOLÓGICOS DA PLATAFORMA INSULAR

Na **Tabela 5.7** é possível observar os parâmetros considerados para o cálculo da h_{in} e o seu respetivo valor, após a utilização da **Equação 3.1**. O resultado indica uma profundidade de 25.44 m, valor utilizado, posteriormente, no mapeamento na batimetria.

Tabela 5.7: Valores relevantes para o Cálculo da *Inner Shelf* e o seu respetivo valor.

Média Hs	1.907
g	9.810
$T_p,0.1$	7.373
$T_p,0.1^2$	54.365
2π	6.283
Inner Shelf (m)	25.44

Na **Tabela 5.8** é possível observar os parâmetros considerados para o cálculo da h_{mid} e o seu respetivo valor, após a utilização da **Equação 3.3**. O resultado indica uma profundidade de 84.87 m, valor utilizado, posteriormente, no mapeamento na batimetria.

Tabela 5.8: Valores relevantes para o Cálculo da *Mid Shelf* e o seu respetivo valor.

g	9.810
$H_{sp,0.75}$	2.268
$T_p,0.75$	12.901
uw,cr	0.174
4π	12.566
K	1.550
Mid Shelf (m)	84.87

Na **Tabela 5.9** é possível observar os parâmetros relevantes para o cálculo da w_b e o seu respetivo valor, após a utilização da **Equação 3.4**. O resultado indica uma profundidade de 92.67 m, valor utilizado, posteriormente, no mapeamento na batimetria.

Tabela 5.9: Valores relevantes para o Cálculo da *Wave Base* e o seu respetivo valor.

L	185.344
Wave Base (m)	92.67

5.3 LIMITES GEOMORFOLÓGICOS DA PLATAFORMA INSULAR

Após a determinação dos diferentes limites geomorfológicos da plataforma insular, os valores foram representados, conjuntamente com a batimetria, no *ArcGIS Pro*. Através da análise da **Figura 5.12** é possível constatar-se que o limite mais externo está próximo de uma variação abrupta da morfologia de fundo, isto porque é possível perceber um declive mais elevado. Existem duas zonas do limite mais

externo que não são coincidentes com o declive elevado (marcadas a rosa). De forma a obter uma melhor visualização relativamente à variação do declive do fundo foi criado um mapa de declives da plataforma insular de Porto Santo (**Figura 5.13**), no *ArcGIS Pro*.

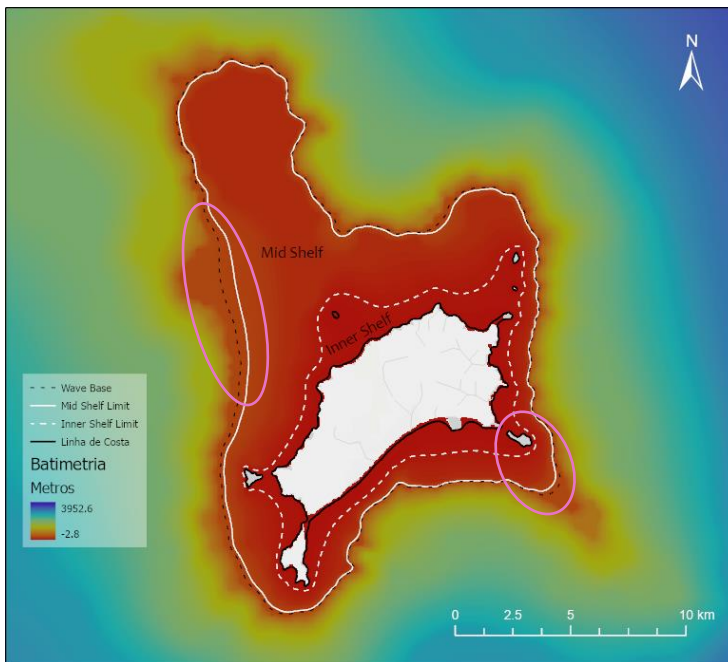


Figura 5.12: Mapa com representação dos limites geomorfológicos da plataforma insular de Porto Santo, determinados por wave base, mid shelf limit e Inner shelf limit. Associado ao método indireto que prevê a profundidade em função dos parâmetros médios de agitação.

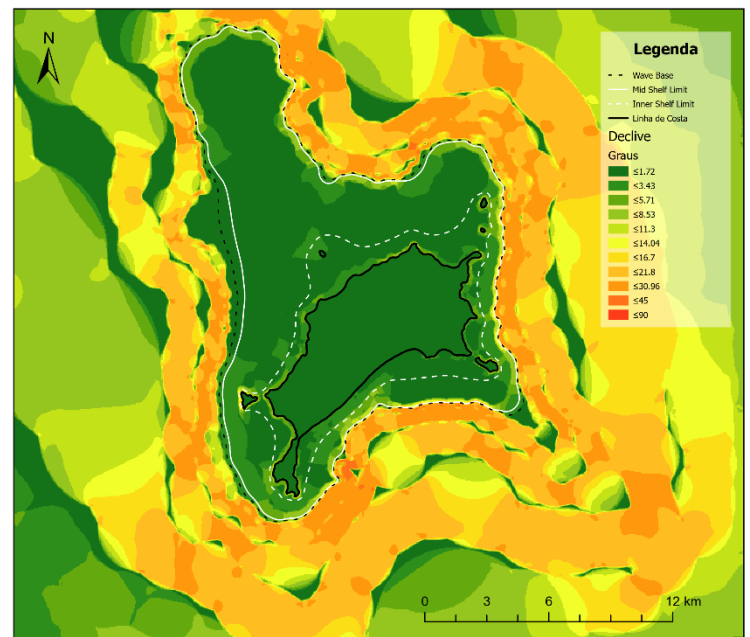


Figura 5.13: Mapa de declives da plataforma insular de Porto Santo.

Os limites geomorfológicos da plataforma insular do Porto Santo calculados parecem coincidir com a configuração morfológica do fundo, tendo a h_{in} 25.44 m, a h_{mid} 84.87 m e a w_b 92.67 m. Através do mapa de declives é possível constatar que efetivamente os limites da plataforma externa calculados são bastante idênticos à batimetria e, conseqüentemente, com a configuração morfológica do fundo. Por outro lado, não é possível observar com critério os limites da plataforma interna, os valores obtidos podem estar associados a possíveis erros de cálculo e alguma imprecisão que estes sistemas SIG podem estar sujeitos.

5.4 REMOBILIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA PARA A BAÍA DE PORTO SANTO

Após a leitura dos dados utilizando o *software SWAN* e do modelo do cálculo da remobilização sedimentar, foram gerados diversos mapas de potencial remobilização para os 4 cenários predominantes. Foram tidos em consideração os valores da variação espacial de D_{50} da campanha do IH, da média da análise granulométrica (areias finas e areias médias) e ainda a capacidade de remobilização para os diferentes diâmetros de sedimentos, tendo em conta as características de cada cenário. Por forma a tornar mais intuitiva a visualização, foram selecionadas a cor verde e o número 1 quando o modelo prevê que existe remobilização e a cor vermelha e o número 0 quando o modelo não prevê a existência de

remobilização. Na **Figura 5.14**, os mapas representados correspondem ao cenário 1, e é claramente visível que à medida que o diâmetro dos sedimentos aumenta, a remobilização diminui. De notar que junto à costa, o potencial de remobilização é extremamente reduzido e praticamente inexistente para o diâmetro das areias muito grosseiras.

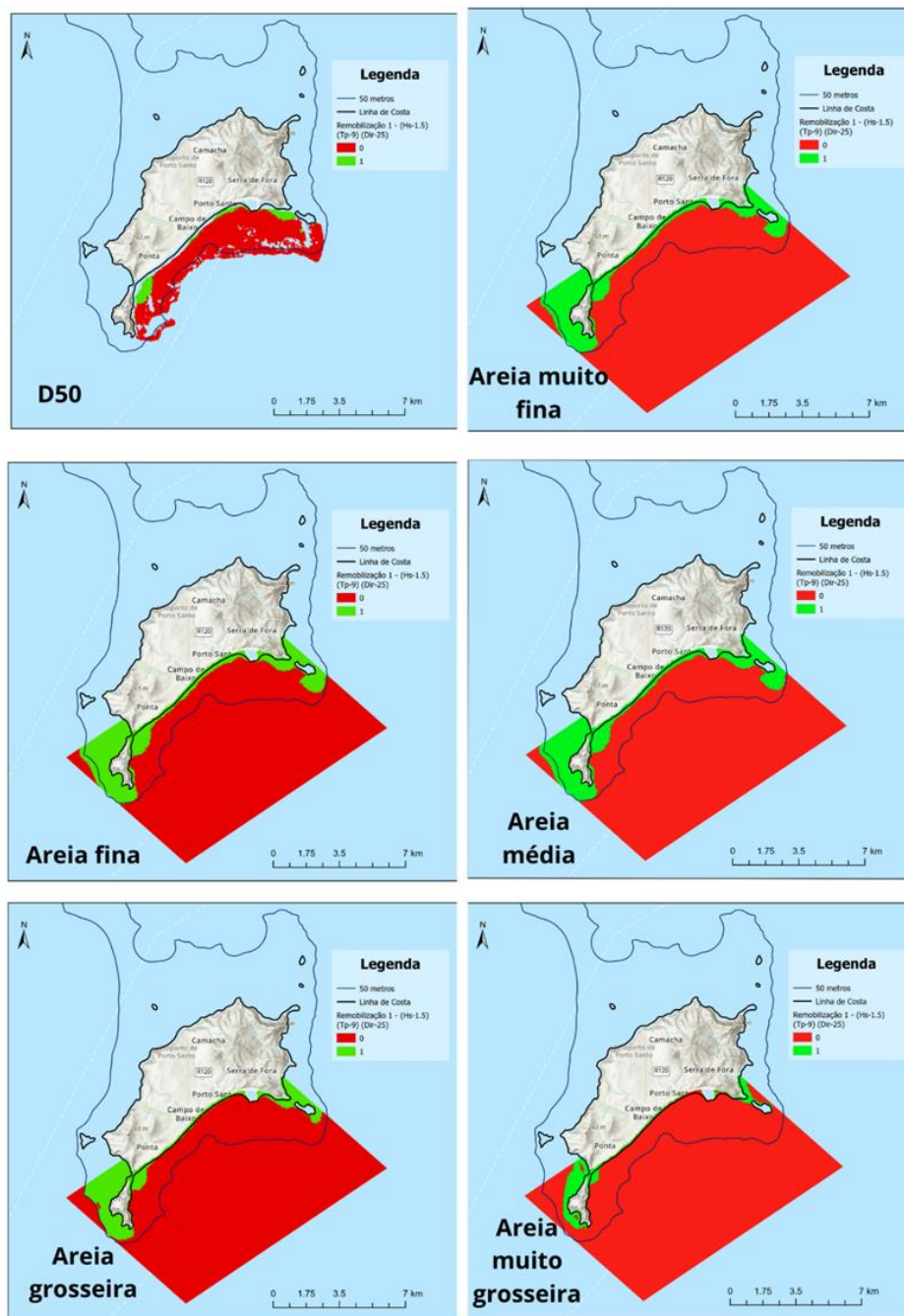


Figura 5.14: Potencial de remobilização para o cenário 1.

Os mapas representados na **Figura 5.15** correspondem ao cenário 2, que à semelhança com os mapas do cenário 1, apresentam um menor potencial de remobilização à medida que o diâmetro dos sedimentos aumenta. No entanto, é importante salientar que apesar de pouco significativos, os potenciais de remobilização em todos os mapas são superiores aos do cenário 1. O mapa que representa o potencial de remobilização para o D_{50} , em comparação com o cenário 1, apresenta uma taxa de potencial de remobilização maior.

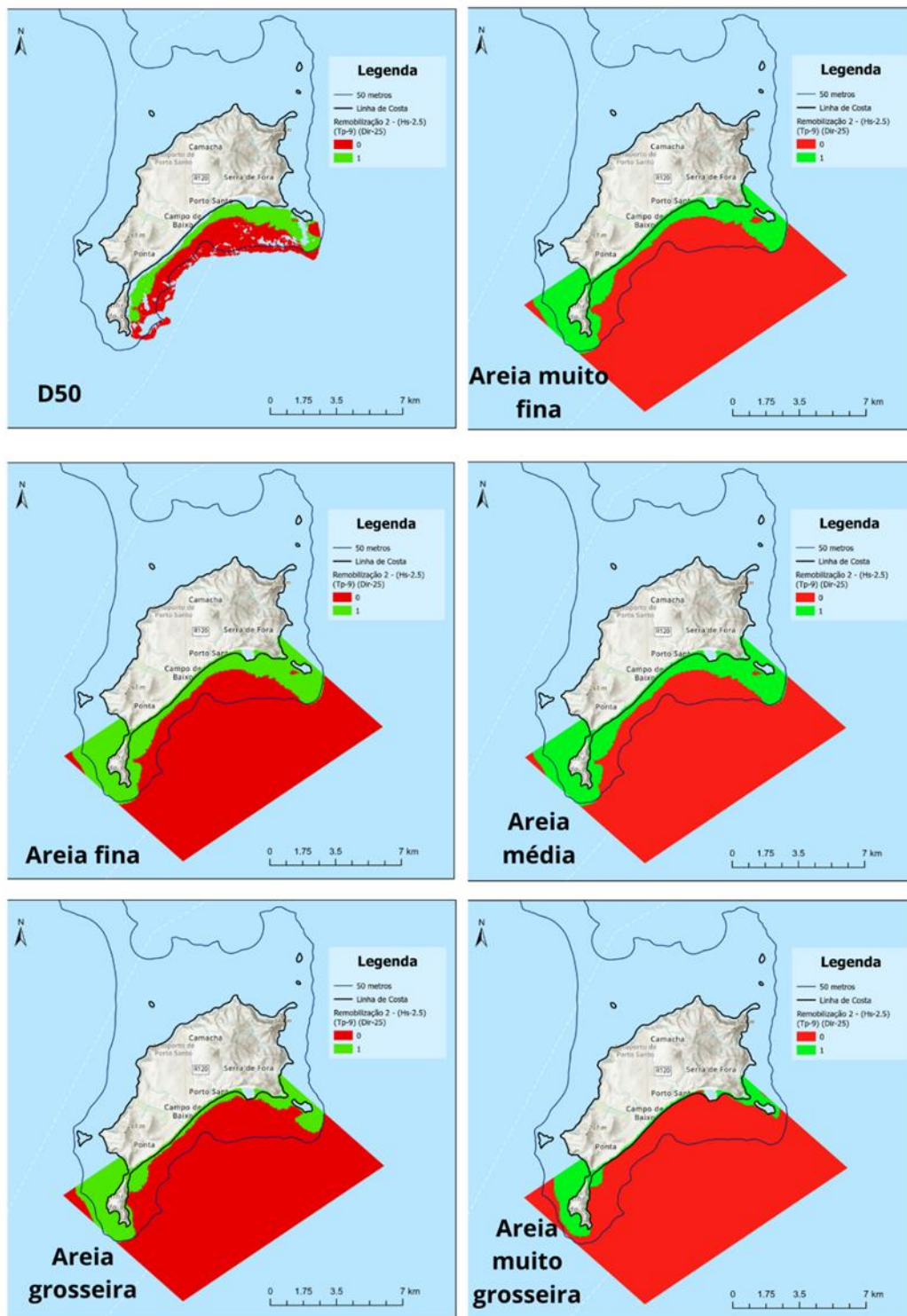


Figura 5.15: Potencial de remobilização para o cenário 2.

Os mapas representados na **Figura 5.16** são referentes ao cenário 3, e ao contrário dos cenários acima mencionados, em todos os diâmetros de sedimento, o potencial de remobilização é predominante nas zonas dos ilhéus, enquanto junto à costa é relativamente baixo. Não obstante, observa-se que o potencial de remobilização diminui à medida que o diâmetro dos sedimentos aumenta, seguindo uma tendência semelhante aos cenários anteriores.

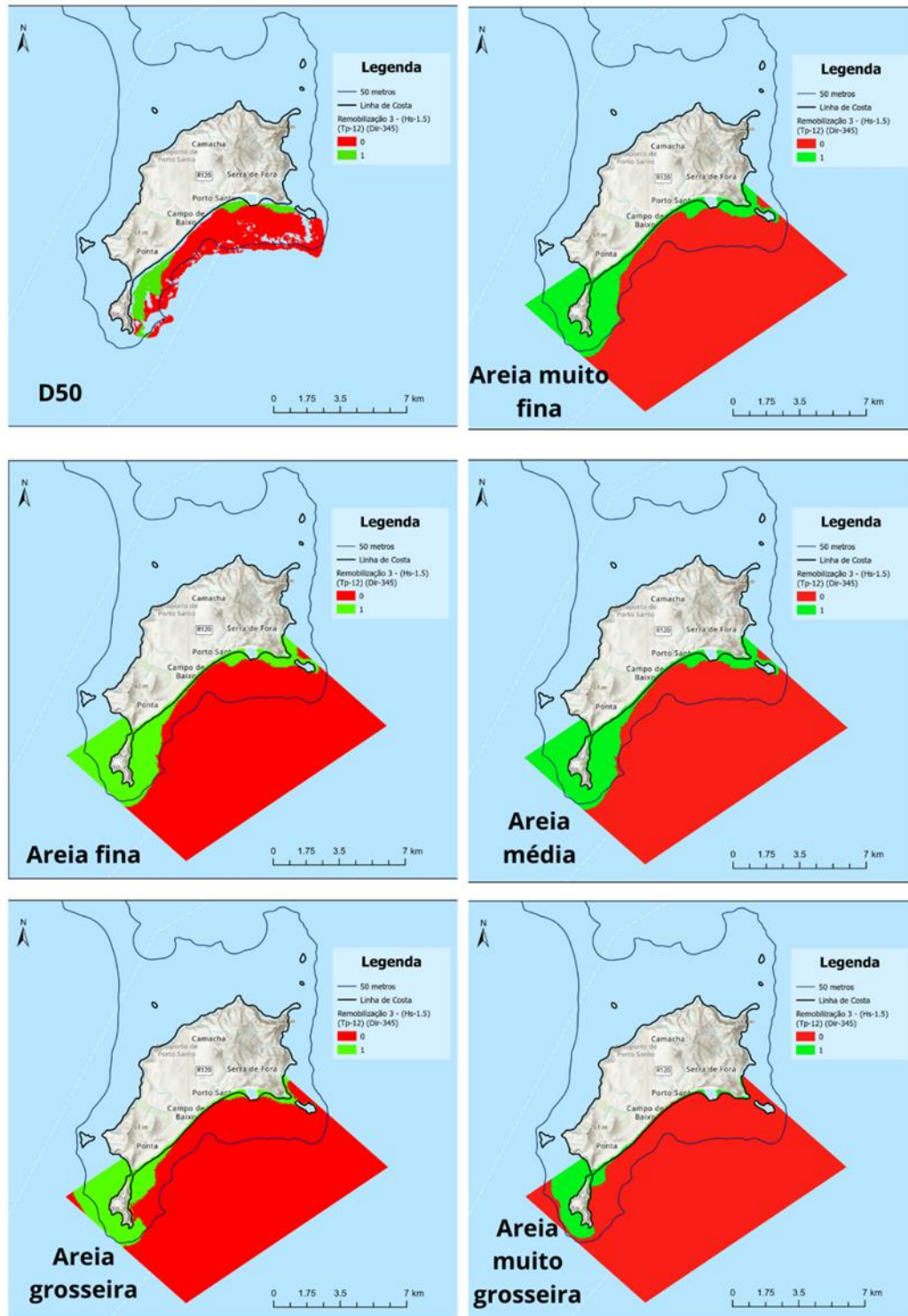


Figura 5.16: Potencial de remobilização para o cenário 3.

Para o cenário 4 os mapas da **Figura 5.17**, como nos cenários anteriores, apresentam um menor potencial de remobilização à medida que o diâmetro dos sedimentos aumenta. Não obstante, é notável que, em comparação com o cenário 3, o potencial junto à costa é mais saliente, embora ainda haja uma certa predominância na zona dos ilhéus.

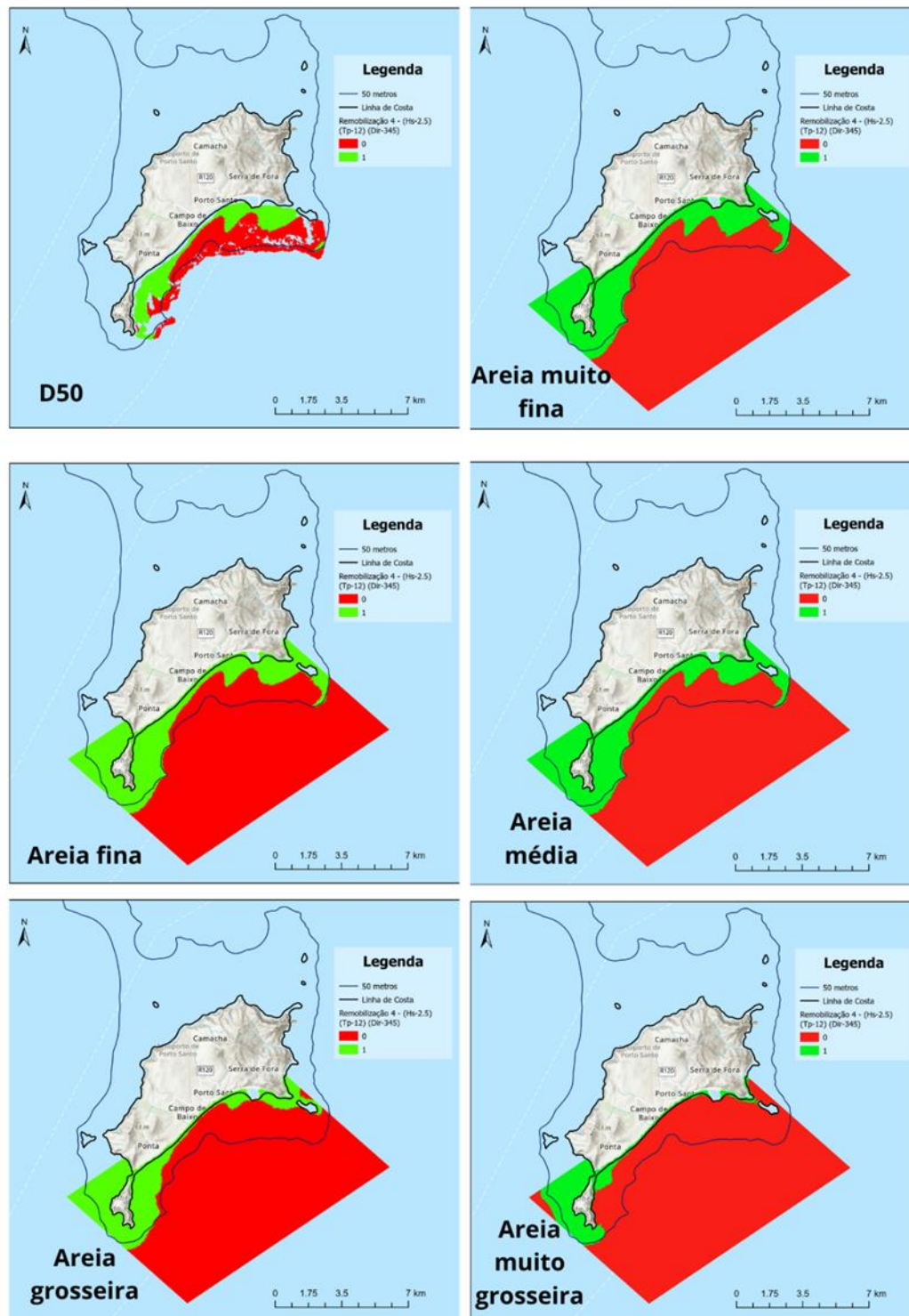


Figura 5.17: Potencial de remobilização para o cenário 4.

Finalmente, os mapas representados na **Figura 5.18** representam o potencial de remobilização associado ao evento de temporal de 2 de setembro de 1987, para a dimensão dos sedimentos escolhida, de forma a representar os resultados, foi tida em conta a média da análise granulométrica das amostras, ou seja, areias finas e areias médias e, ainda os valores de D_{50} . É perceptível que existem algumas semelhanças com os cenários 2 e 4, uma vez que, ambos indicam a possibilidade de remobilização de sedimentos referentes à dimensão das areias finas e das areias médias tanto junto à costa como ao redor dos ilhéus.

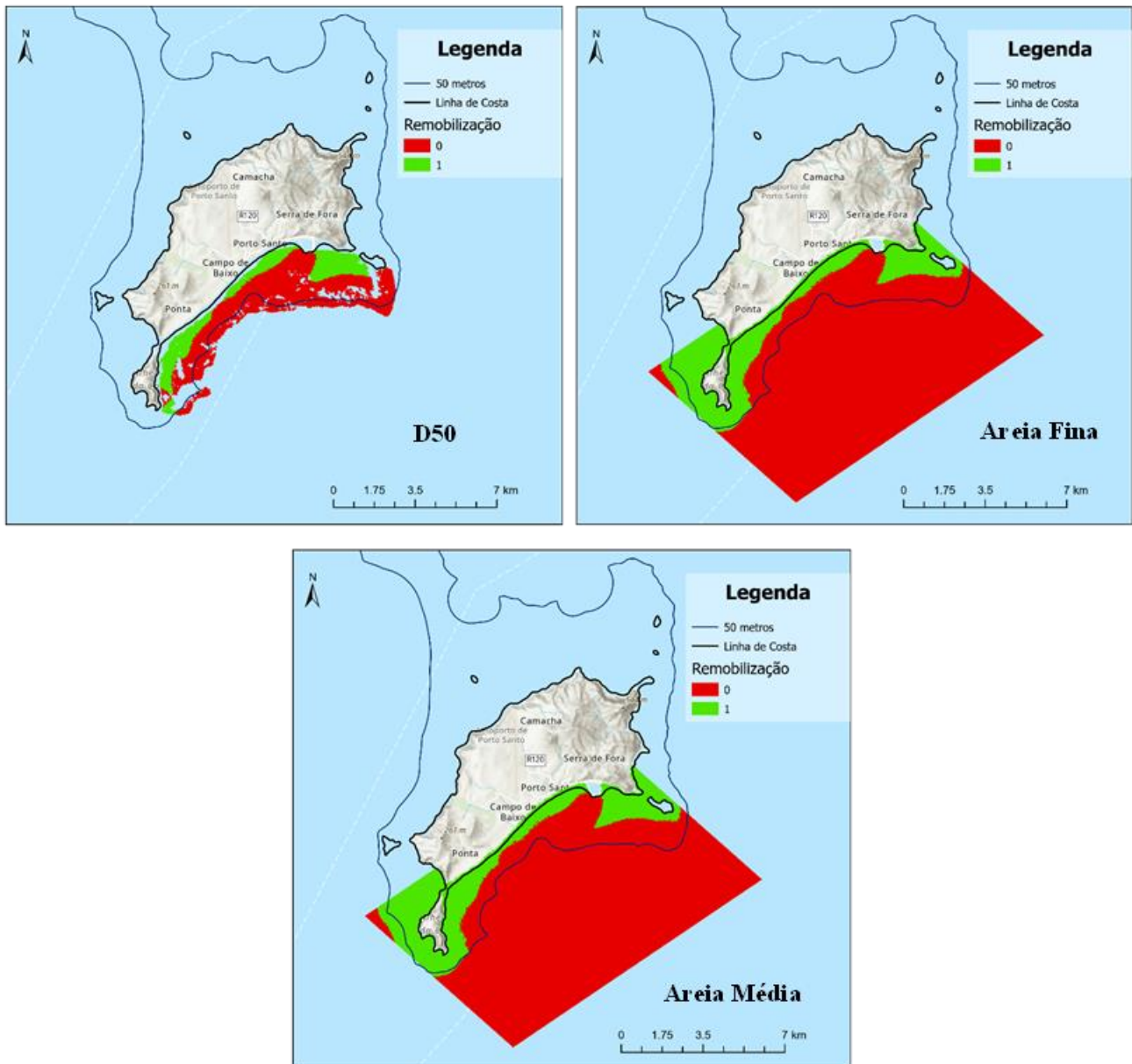


Figura 5.18: Potencial de remobilização para o temporal de 2 de setembro de 1987.

No que diz respeito ao potencial de remobilização em todos os cenários predominantes é possível constatar que quando o diâmetro dos sedimentos aumenta o potencial de remobilização diminui. No cenário 1 o potencial de remobilização junto à costa é extremamente reduzido, tal como no cenário 3. Em contrapartida, no cenário 2 o potencial no mapa referente ao D_{50} é ligeiramente superior ao potencial do cenário 1 e no cenário 4 o potencial é mais saliente junto à costa quando comparado com o cenário 3. Os cenários 3 e 4, por apresentarem a mesma direção apresentam uma semelhança no potencial de remobilização junto aos ilhéus. Por fim, os cenários 2 e 4 apresentam o mesmo H_s e por isso o potencial na largura junto à costa é bastante similar entre eles.

Relativamente ao temporal de 2 de setembro de 1987, os mapas mostram semelhanças com os cenários 2 e 4, no que diz respeito ao potencial na largura junto à costa e ao redor dos ilhéus. De notar, que nos cenários 2 e 4, como suprarreferido, o H_s é igual nos dois cenários e superior aos cenários 1 e 3, por isso, era de esperar que o potencial de remobilização junto à costa fosse superior comparativamente aos cenários 1 e 3. A comparação efetuada com o temporal mais elevado da escala temporal auxilia nessa observação.

É ainda possível constatar que em todos os cenários predominantes e no temporal existe uma maior remobilização junto aos ilhéus.

Com isto, é importante referir que as manchas a verde não implicam em si a quantidade de sedimento que pode sofrer remobilização, mas sim em que zonas a remobilização pode ocorrer, ou seja, a quantidade de sedimento remobilizado pode ser quase insignificante como apresentar valores já bastantes consideráveis, dependendo dos fatores que influenciam a remobilização mencionados acima.

Por fim, foram gerados 3 mapas que combinam os potenciais de remobilização do cenário 1 (R1), cenário 3 (R3) e do temporal (T), como consta na **Figura 5.19**. Em todos os cenários os vetores coincidem com as regiões com potencial de remobilização, não obstante, no cenário de temporal é evidente que os vetores têm tendência a ir ao encontro da zona central da baía, confirmando o potencial de remobilização a verde. O mesmo se pode dizer do cenário 3, no entanto, os vetores têm tendência a ir ao encontro das zonas laterais da baía, deixando a zona central com pouca influência, também observável nas manchas a verde nas regiões laterais da baía. No cenário 3 e no cenário de temporal a direção dos vetores é extremamente semelhante devido à direção inicial da onda (345° para o cenário 3 e 340° para o cenário de temporal), pelo contrário o cenário 1 apresenta uma direção inicial da onda de 25° , tornando assim um pouco diferente a disposição final dos vetores de direção e, conseqüentemente, potenciais de remobilização diferentes.

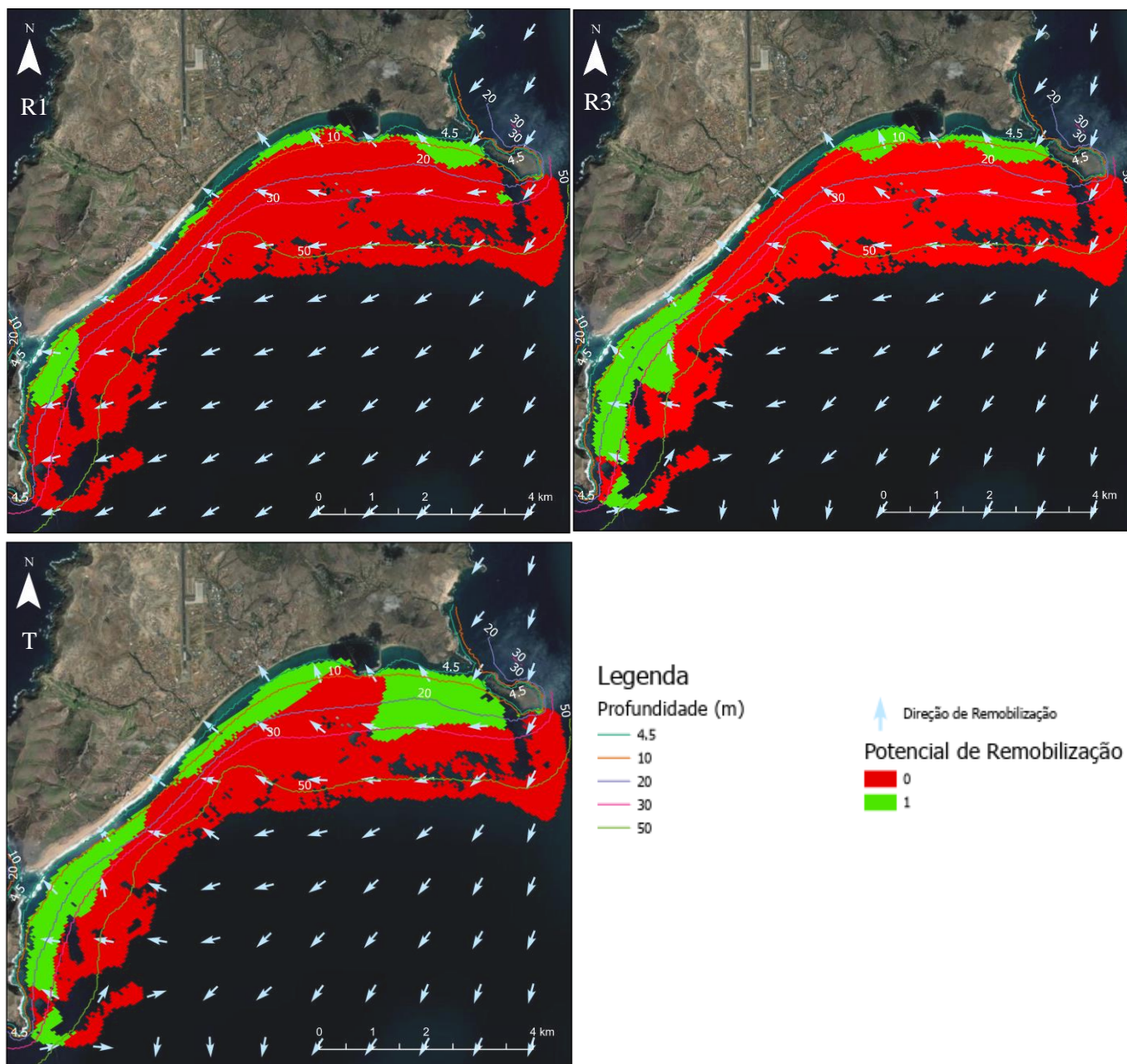


Figura 5.19: Mapa de potencial de remobilização do cenário 1, cenário 3 e cenário de temporal, com os vetores referentes à direção de tendência de remobilização.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Graças à realização deste trabalho foi possível proceder à contribuição, interpretação e estudo da dinâmica sedimentar da baía do Porto Santo, sendo possível, então, constatar que os objetivos propostos inicialmente foram atingidos com sucesso.

Tendo em consideração os resultados obtidos, foi possível obter as seguintes conclusões principais:

- A caracterização sedimentar na baía e a investigação da sua variabilidade espaço-temporal, através da análise de sondagens verticais curtas em profundidade, realizadas em diversos locais da plataforma insular de Porto Santo e a realização de amostragem sedimentar superficial nos ambientes de praia submarina, praia emersa e dunas foi realizada com sucesso, uma vez que foi possível caracterizar as determinadas propriedades físicas do sedimento local, sendo que constata-se que os sedimentos predominantes da baía do Porto Santo são referentes às areias finas e areias médias;
- Foi possível caracterizar alguns exemplos de condições oceanográficas ao largo e junto à costa, aplicando modelos de propagação marítima do largo para a baía, de forma a caracterizar o forçamento junto à costa, através do *software SWAN* e, posterior mapeamento em ambiente *GIS*, de forma, a obter uma melhor visualização dos resultados obtidos;
- O potencial impacto de ondas com diferentes características (direção, altura significativa e período médio) e morfologia no fundo, constituída por sedimentos de diversas dimensões, que podem interagir com a dinâmica sedimentar do fundo. Estes dois fatores têm, por sua vez, influência sobre os limites geomorfológicos da plataforma, como foi possível observar na análise do potencial de remobilização da agitação marítima, onde os sedimentos com diferentes diâmetros têm distintas respostas a diferentes características de agitação marítima, influenciando assim o potencial de remobilização;
- Através do cálculo dos limites geomorfológicos foi possível concluir que os valores obtidos parecem coincidir com a configuração morfológica do fundo, demonstrando que os métodos empíricos e morfológicos utilizados podem ser tidos em conta no estudo dos limites das plataformas;
- A aplicação de modelos de cálculo do limiar de remobilização sedimentar em ambientes de plataforma, tendo como forçamento as ondas auxiliaram na avaliação do potencial de transporte ou remobilização sedimentar;
- Através da criação dos mapas com os vetores de direção de tendência foi possível constatar que a remobilização se dá no sentido da direção das ondas, influenciando assim no próprio potencial de remobilização sedimentar;
- A implementação do cálculo do limiar de remobilização sedimentar, através da ferramenta concebida, destacou as áreas mais suscetíveis a remobilização;
- Por fim, foi possível contribuir para a interpretação dos processos sedimentares da baía, deixando a possibilidade de continuação do trabalho desenvolvido até ao momento.

Infelizmente, não foi possível caracterizar as propriedades químicas dos sedimentos, sendo então um dos trabalhos futuros necessários a ser realizado para um melhor conhecimento dos sedimentos locais.

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que a agitação marítima desempenha um papel fundamental na distribuição dos sedimentos nas zonas costeiras e por ser extremamente dinâmica afeta de forma sistemática a evolução costeira. Foi possível perceber que com determinadas características de agitação marítima os sedimentos mais grosseiros podem sofrer remobilização, principalmente nas zonas ocupadas pelos ilhéus.

Em suma, a caracterização sedimentar e a caracterização da agitação marítima revelam-se de extrema importância para o estudo e conhecimento da dinâmica sedimentar da baía do Porto Santo, e com isto, revelam o peso que têm para o ordenamento do território no fornecimento de ferramentas de apoio para uma melhor gestão costeira e melhores adaptações às alterações climáticas futuras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C., Freitas, M.C., Taborda, R., Padra, S. (2008). Plano de urbanização para a frente de mar Campo de Baixo/Ponta da Calheta, Porto Santo. Relatório técnico, Universidade de Lisboa e Universidade da Madeira, 58 p.
- Andrade, C., Taborda, R., Ribeiro, M., Silva, A. (2017). “Estudo da dinâmica sedimentar da praia de Porto Santo.” Relatório Final.
- Bosnic, I. 2017. Nearshore sedimentary dynamics in a wave-dominated coast. PhD thesis. University of Lisbon, Portugal, 196 pp.
- Brunn, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbor Division*, 88:117–130.
- Clímaco, M., Oliveira, F.S.B.F., Vicente, C. (2005). Manutenção e melhoramento da praia do Porto Santo. III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa.
- Davidson-Arnott, R. (2011). Wave-dominated coasts. In Wolanski, E. and McLusky, D. S., editors, *Treatise on Estuarine and Coastal Science, Volume 3: Estuarine and Coastal Geology and Geomorphology*, pages 73—116. Elsevier.
- FCUL (2021a) - ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE SONDAGENS NA BAÍA DE PORTO SANTO - ESPESSURA DE SEDIMENTOS E POSSÍVEIS LOCAIS PARA MANCHA DE EMPRÉSTIMO. Relatório interno do projeto LIFE Dunas, FCUL Agosto 2021.
- FCUL (2021b) – Sondagens de amostragem vertical – Subamostragem para análise química e textural. Relatório interno do projeto LIFE Dunas, FCUL Setembro 2021.
- Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Ferreira, M.P. (1985). Evolução geocronológica e paleomagnética das ilhas do arquipélago da Madeira – uma síntese. *Memórias e Notícias, Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, 99: 213-218.
- Ferreira, M.P., Neiva, J.C. (1996). Carta Geológica de Portugal, Folha do Porto Santo à escala 1:25 000, Universidade de Coimbra/Instituto Geológico e Mineiro.
- Fortes, C.J., Capitão, R., Neves, M.G., Coli, A.B. (2004a). Caracterização e Propagação da Agitação Marítima na Praia do Porto Santo, Madeira. *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 25 (2):25-42. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH), Lisboa.
- Fortes, C.J.E.M., Coli, A.B., Neves, M.G., Capitão, R.(2004b). Porto Santo Island: Offshore wave characterization and propagation. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 1600-1605.
- Hallermeier, R.J., 1978. Uses for a calculated limit depth to beach erosion. In: *Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference*. ASCE, New York, pp. 1493–1512.
- Hallermeier, R. J. (1981). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4:253–277.
- Hanson, H., Camenen, B. (2007). Closed form solution for threshold velocity for initiation of sediment motion under waves. In *Proc. Coastal Sediments* , 7, 15-28.
- Instituto Hidrográfico (2008). Caracterização dos depósitos sedimentares da plataforma insular sul da ilha do Porto Santo. Relatório Técnico, REL.TF.GM01/08, Relatório Final, Instituto Hidrográfico, Lisboa.
- Mata, J., Fonseca, P., Prada, S.; Rodrigues, D., Martins, S., Ramalho, R., Madeira, J., Cachão, M., Silva, C., Matias, M. (2013). “O arquipélago da Madeira.” Em *Geologia de Portugal*,

Volume II: geologia Meso-cenozoica de Portugal, de Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J. Lisboa: Escolar editora, pp. 718-724.

- Nicholls, R. J., Birkemeier, W. A., Lee, G.-h. (1998). Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA. *Marine Geology*, 148:179–201.
- NOAA, 2017. Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. Technical Report NOS CO-OPS 083 (56 p).
- Robertson, W., Zhang, K., Finkl, C. W., Whitman, D. (2008). Hydrodynamic and geologic influence of event-dependent depth of closure along the South Florida Atlantic Coast. *Marine Geology*, 252:156–165.
- Poli, P., Hersbach, H., Dee, D. P., Berrisford, P., Simmons, A. J., Vitart, F., ... & Fisher, M. (2016). ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *Journal of Climate*, 29(11), 4083-4097.
- Rosati, J. D. (2005). Concepts in Sediment Budgets. *Journal of Coastal Research*, 212(1966):307–322.
- Rosati, J. D., Dean, R. G., Walton, T. L. (2013). The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340:71–81.
- Silva, A. N., Taborda, R., Andrade, C., Ribeiro, M. (2019). The future of insular beaches: Insights from a past-to-future sediment budget approach. *Science of The Total Environment*, 676, 692-705.
- Supplementary material – 3, for Silva, A., Taborda, R., Andrade, C., Ribeiro, M. (2019). The future of insular beaches: insights from a past-to-future sediment budget approach. *Science of The Total Environment*.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford.
- Taborda, R.. (2015) *Mecânica do Transporte sedimentar em ambientes costeiros e de plataforma*. Relatório não publicado. Departamento Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Valiente, N.G., Masselink, G., Scott, T., Conley, D., McCarroll, J. (2019). Evaluation of the role of waves and tides on depth of closure and potential for headland bypassing. *Marine Geology* 407, 60-75.
- The SWAN team, Delft University of Technology (2006) – SWAN USER MANUAL (SWAN Cycle III version 40.51).

8. ANEXOS

Fotografias da abertura de sondagens

Análise das sondagens da FCUL (todas as fotografias foram retiradas do relatório LIFE Dunas 2021 – Sondagens de amostragem vertical – Subamostragem para análise química e textural):

- UL E1

A sondagem UL E1 atingiu um comprimento de 1.70 m e é constituída por areia média a fina. Apresenta cor cinzenta (devido à matéria orgânica vestigial) e amarela, bem como fragmentos de conchas e alguns calhaus.



- UL E2

A sondagem UL E2 atingiu 2 m de comprimento, sendo também constituída por areia média a fina e aparenta ser bem calibrada. A cor é cinzenta e amarela, sendo possível observar algumas conchas com comprimento distinto.



- UL E3

A sondagem UL E3 atingiu um comprimento de 1.80 m e é constituída por areia média, sendo bem calibrada. Apresenta cor cinzenta e amarela, sendo possível observar alguns calhaus e algumas conchas, sendo que a maioria das conchas de casca fina se encontra no topo da sondagem.



- UL E4

A sondagem UL E4 atingiu um comprimento de 1.40 m e é constituída por areia média a grosseira, parecendo bem calibrada. Apresenta cor cinzenta e amarela e são observáveis alguns fragmentos de conchas. É possível observar também intercalações de areia grosseira com conchas partidas no intervalo 0.50-0.52 m e 0.90-0.97 m.



- UL E10

Por fim, a sondagem UL E10 atingiu 1 metro de comprimento e é constituída por areia média e é bem calibrada. Apresenta cor cinzenta escura e amarelada, sendo possível observar algumas conchas muito finas.



Análise das sondagens da DRAAC (todas as fotografias foram retiradas do relatório LIFE Dunas 2021 – Sondagens de amostragem vertical – Subamostragem para análise química e textural):

- DRAAC E5

A sondagem DRAAC E5 atingiu um comprimento de 2.6 m, tendo sido por isso dividida em 2 secções: a primeira entre 0 e 1.3 m (A) e a segunda entre 1.3 e 2.6 m (B). A primeira secção é constituída por areia média a fina e é de cor amarela. É possível observar um nível de conchas, valvas e seixos no intervalo 0.43-0.68 m. Já a segunda secção é constituída por areia média, bem calibrada, também de cor amarela. É possível observar alguns fragmentos de conchas.



- DRAAC E6

A sondagem DRAAC E6 atingiu 3 m de comprimento, tendo sido por isso dividida em 2 secções: a primeira entre 0 e 1.5 m (A) e a segunda entre 1.5 e 3 m (B). A primeira secção é constituída por areia média, bem calibrada, de cor amarela, ligeiramente cinzenta. É possível observar fragmentos de conchas, sendo observável um nível no intervalo 0.62-0.69 m. Já a segunda secção é constituída por areia média a fina, e é também de cor amarela, no entanto apresenta um tom acinzentado que se destaca dos restantes. É possível observar alguns fragmentos de conchas. Quando a sondagem foi aberta sentiu-se um odor a canos.



- DRAAC E7

A sondagem DRAAC E7 atingiu 3 m de comprimento, tendo sido por isso dividida em 2 secções: a primeira entre 0 e 1.5 m (A) e a segunda entre 1.5 e 3 m (B). A primeira secção é constituída por areia média a fina, bem calibrada, e é de cor cinzenta e amarela. É possível observar fragmentos de conchas, sendo observável um nível aos 0.68 m e 2 fragmentos grandes no intervalo 1.19-1.29 m. Já a segunda secção é constituída por areia média, é de cor cinzenta e amarela. É possível observar um nível com alguns fragmentos de conchas pequenas no intervalo 2.50-2.64 m.



- DRAAC E8

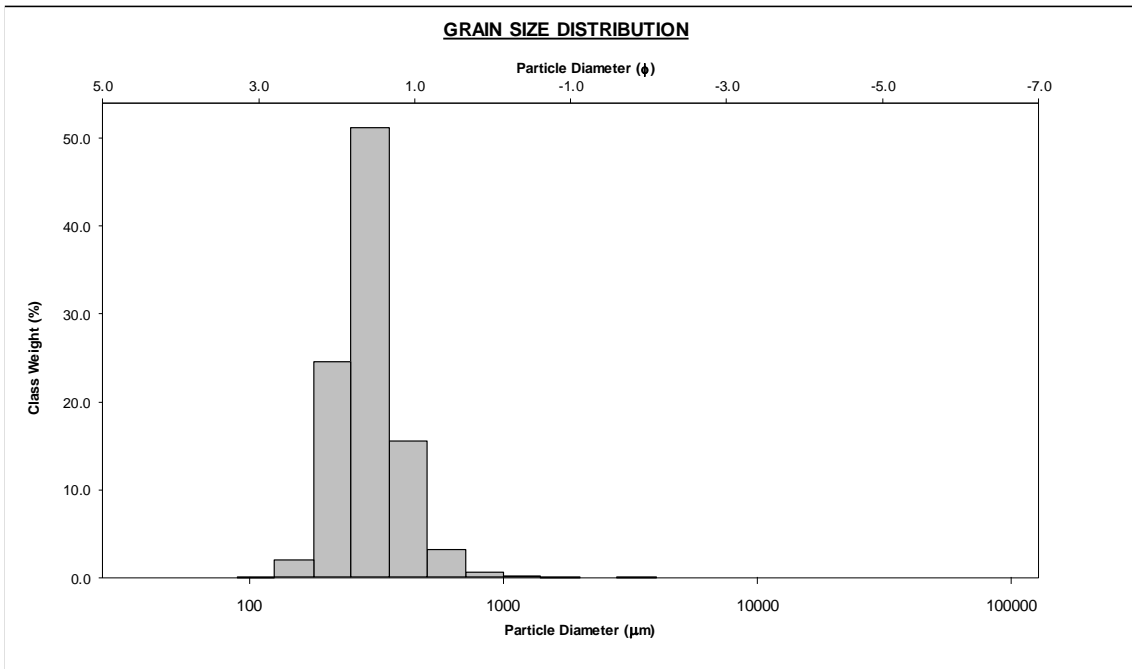
A sondagem DRAAC E8 atingiu de comprimento 1.60 m, tendo sido perdido sedimento inicial. É constituída por areia média a fina, bem calibrada e com cor amarela e cinzenta. É possível observar um nível de fragmentos de conchas no intervalo 0.84-1.13 m. Após o nível a concentração de conchas diminui gradualmente.



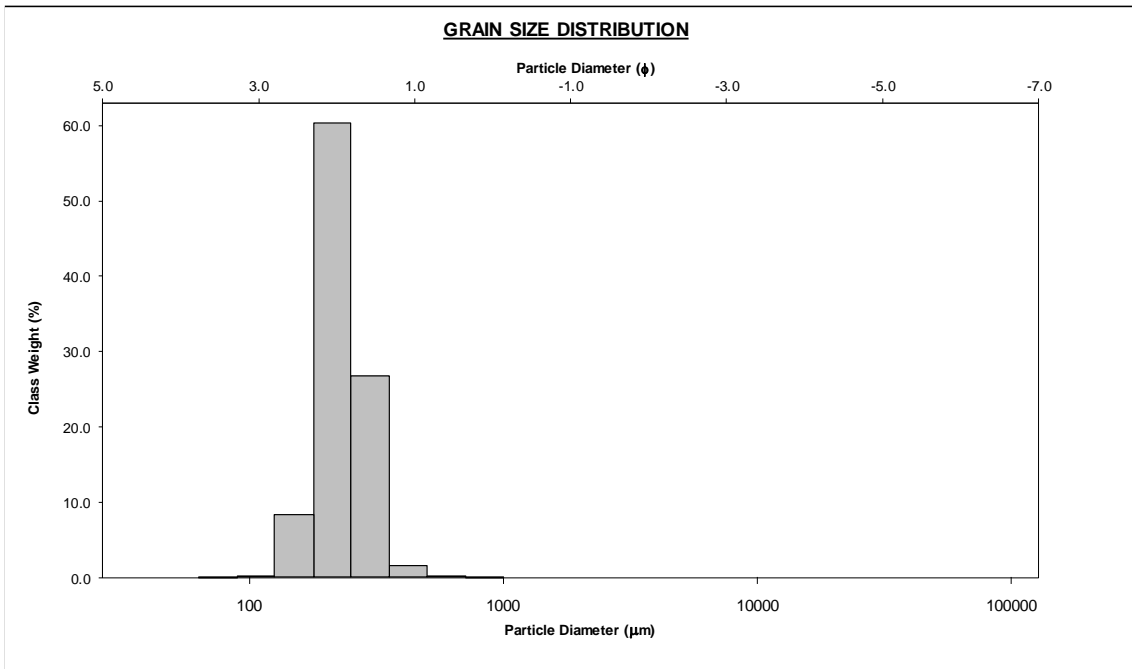
Resultados detalhados da análise granulométrica

Sample Identity:	P. Santo Perfil W001 Face Praia			P. Santo Perfil W002 Berma		
Initial Sample Weight:	105.19			106.27		
	Peso	Frequência	Frequência Acumulada	Peso	Frequência	Frequência Acumulada
-2	0	0.0000	0.000			
-1.5	0.05	0.0005	0.000			
-1	0	0.0000	0.000			
-0.5	0.09	0.0009	0.001			
0.0	0.13	0.0012	0.003	0	0.0000	0.000
0.5	0.66	0.0063	0.009	0.02	0.0002	0.000
1.0	3.52	0.0335	0.042	0.2	0.0019	0.002
1.5	16.74	0.1591	0.201	1.68	0.0158	0.018
2.0	56.37	0.5359	0.737	30.28	0.2849	0.303
2.5	25.39	0.2414	0.979	64.02	0.6024	0.905
3.0	2.22	0.0211	1.000	9.86	0.0928	0.998
3.5	0.03	0.0003	1.000	0.18	0.0017	1.000
4.0	0	0.0000	1.000	0.01	0.0001	1.000
Fundo	0	0.0000	1.000	0.02	0.0002	1.000
Peso Final	105.2	1.0001		106.27	1.0000	
Sample Identity:	P. Santo Perfil W003 Duna			P. Santo Perfil W AM6 1/2		
Initial Sample Weight:	99.66			95.1		
	Peso	Frequência	Frequência Acumulada	Peso	Frequência	Frequência Acumulada
-2				0.16	0.0015	0.002
-1.5				0.28	0.0026	0.004
-1				0.74	0.0070	0.011
-0.5				1.13	0.0106	0.022
0.0				0.92	0.0087	0.030
0.5	0	0.0000	0.000	0.76	0.0072	0.038
1.0	0.01	0.0001	0.000	1.12	0.0105	0.048
1.5	0.15	0.0014	0.002	3.49	0.0328	0.081
2.0	12.99	0.1235	0.125	18.15	0.1708	0.252
2.5	64.06	0.6090	0.734	29.3	0.2757	0.527
3.0	21.82	0.2074	0.941	27.82	0.2618	0.789
3.5	0.5	0.0048	0.946	8.36	0.0787	0.868
4.0	0.04	0.0004	0.947	1.1	0.0104	0.878
Fundo	0.03	0.0003	0.947	1.75	0.0165	0.895
Peso Final	99.60	0.9469		95.08	0.8947	
Sample Identity:	P. Santo Perfil W AM7 1/2			P. Santo Perfil W AM8		
Initial Sample Weight:	91.15			103.97		
	Peso	Frequência	Frequência Acumulada	Peso	Frequência	Frequência Acumulada
-2	0.24	0.0023	0.002			
-1.5	0.3	0.0029	0.005	0.01	0.0001	0.000
-1	0.87	0.0083	0.013	0.16	0.0015	0.002
-0.5	1.29	0.0123	0.026	0.23	0.0022	0.004
0.0	1.01	0.0096	0.035	0.35	0.0033	0.007
0.5	0.8	0.0076	0.043	0.55	0.0052	0.012
1.0	1.14	0.0108	0.054	1.32	0.0124	0.025
1.5	3.28	0.0312	0.085	3.73	0.0351	0.060
2.0	16.45	0.1564	0.241	20.55	0.1934	0.253
2.5	28.5	0.2709	0.512	36.72	0.3455	0.599
3.0	26.32	0.2502	0.762	32.59	0.3067	0.905
3.5	7.73	0.0735	0.836	7.03	0.0662	0.971
4.0	1.3	0.0124	0.848	0.5	0.0047	0.976
Fundo	1.73	0.0164	0.865	0.22	0.0021	0.978
Peso Final	90.96	0.8647		103.96	0.9783	
Sample Identity:	P. Santo Perfil W AM9			P. Santo Perfil W AM10		
Initial Sample Weight:	91.68			103.52		
	Peso	Frequência	Frequência Acumulada	Peso	Frequência	Frequência Absoluta
-2				0	0.0000	0.000
-1.5	0.04	0.0004	0.000	0.02	0.0002	0.000
-1	0.08	0.0008	0.001	0	0.0000	0.000
-0.5	0.12	0.0011	0.002	0.07	0.0007	0.001
0.0	0.24	0.0023	0.005	0.11	0.0010	0.002
0.5	0.62	0.0059	0.010	0.29	0.0027	0.005
1.0	1.67	0.0159	0.026	0.97	0.0091	0.014
1.5	5.66	0.0538	0.080	4.86	0.0457	0.059
2.0	27.32	0.2597	0.340	31.32	0.2947	0.354
2.5	33.92	0.3225	0.662	44.99	0.4234	0.778
3.0	18.72	0.1780	0.840	18.23	0.1715	0.949
3.5	2.97	0.0282	0.869	2.37	0.0223	0.971
4.0	0.28	0.0027	0.871	0.1	0.0009	0.972
Fundo	0.05	0.0005	0.872	0.12	0.0011	0.973
Peso Final	91.69	0.8717		103.45	0.9735	

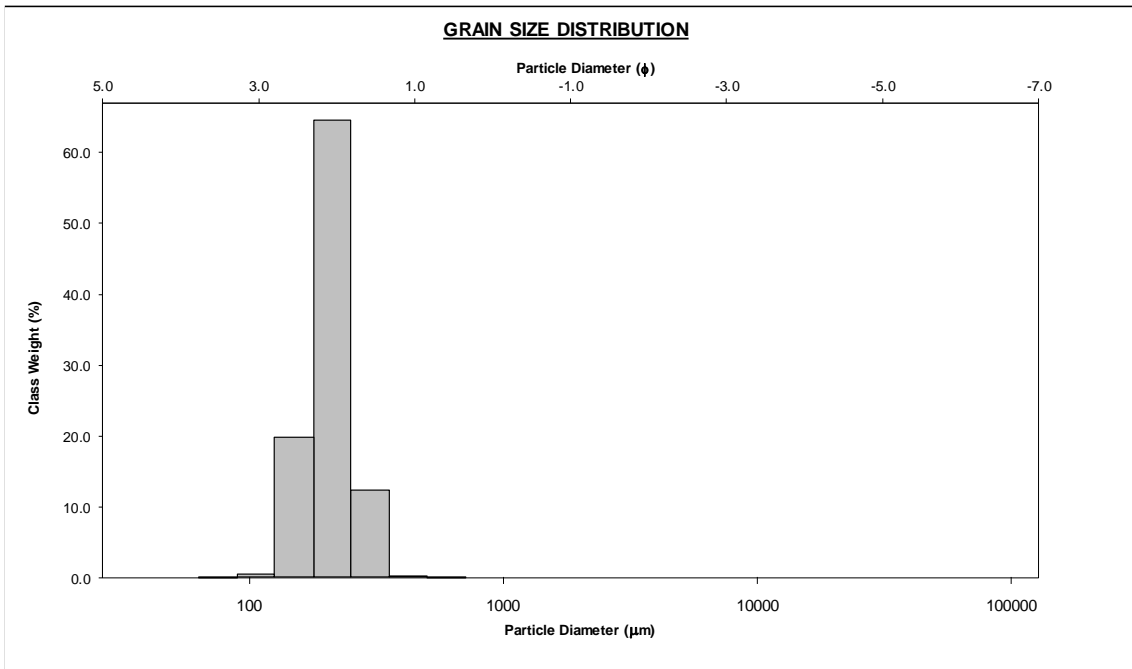
		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.0%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 29/03/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W001 Face Praia					TEXTURAL GROUP: Slightly Gravelly Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Well Sorted						
SEDIMENT NAME: Slightly Very Fine Gravelly Medium Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 0.0%	COARSE SAND: 4.0%
MODE 2:	302.5	1.747			SAND: 100.0%	MEDIUM SAND: 69.5%
MODE 3:					MUD: 0.0%	FINE SAND: 26.2%
D ₁₀ :	200.3	1.179			V COARSE GRAVEL: 0.0%	V FINE SAND: 0.0%
AN or D ₅₀ :	292.0	1.776			COARSE GRAVEL: 0.0%	V COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ :	441.6	2.320			MEDIUM GRAVEL: 0.0%	COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ / D ₁₀ :	2.204	1.967			FINE GRAVEL: 0.0%	MEDIUM SILT: 0.0%
D ₉₀ - D ₁₀ :	241.3	1.140			V FINE GRAVEL: 0.0%	FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.400	1.315			V COARSE SAND: 0.2%	V FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ - D ₂₅ :	98.19	0.485				CLAY: 0.0%
		METHOD OF MOMENTS		FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	315.4	295.7	1.758	291.0	1.781	Medium Sand
SORTING (σ):	129.8	1.345	0.427	1.338	0.420	Well Sorted
SKEWNESS (S_k):	8.571	0.947	-0.947	0.030	-0.030	Symmetrical
KURTOSIS (K):	168.1	7.105	7.105	1.178	1.178	Leptokurtic



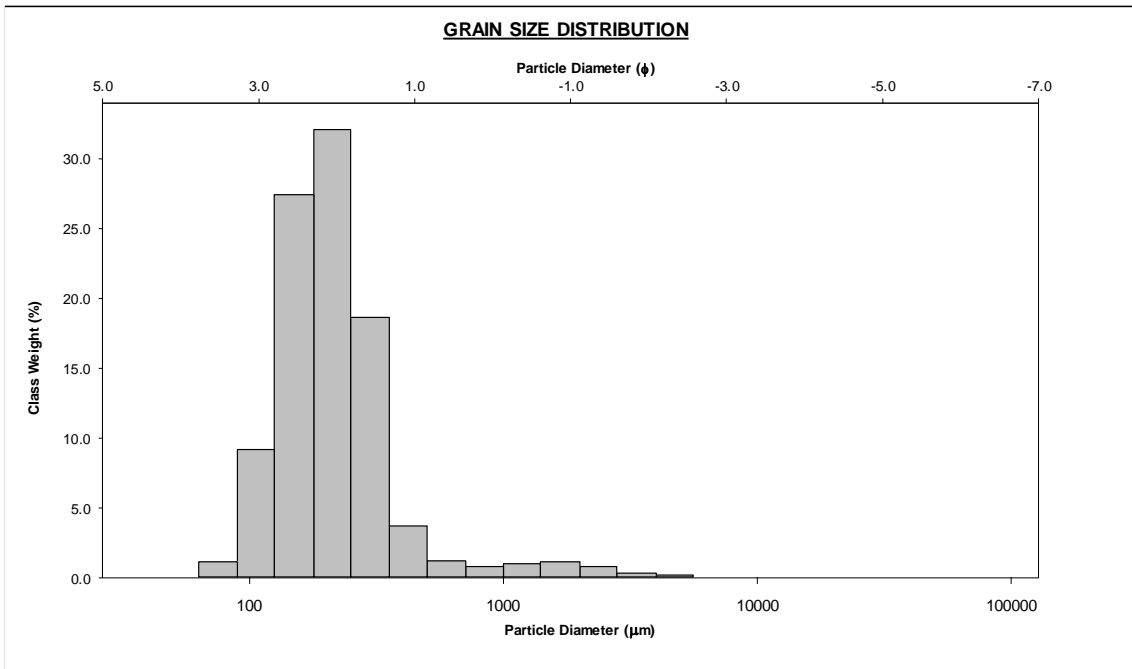
		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.0%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 29/03/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W002 Berma					TEXTURAL GROUP: Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Very Well Sorted						
SEDIMENT NAME: Very Well Sorted Fine Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 0.0%	COARSE SAND: 0.2%
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 100.0%	MEDIUM SAND: 30.1%
MODE 3:					MUD: 0.0%	FINE SAND: 69.5%
D ₁₀ :	180.5	1.640			V COARSE GRAVEL: 0.0%	V FINE SAND: 0.2%
AN or D ₅₀ :	224.5	2.155			COARSE GRAVEL: 0.0%	V COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ :	320.9	2.470			MEDIUM GRAVEL: 0.0%	COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ / D ₁₀ :	1.778	1.506			FINE GRAVEL: 0.0%	MEDIUM SILT: 0.0%
D ₉₀ - D ₁₀ :	140.4	0.830			V FINE GRAVEL: 0.0%	FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.362	1.234			V COARSE SAND: 0.0%	V FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ - D ₂₅ :	70.89	0.446				CLAY: 0.0%
		METHOD OF MOMENTS		FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	238.1	228.8	2.128	232.0	2.108	Fine Sand
SORTING (σ):	55.81	1.253	0.326	1.272	0.347	Very Well Sorted
SKEWNESS (S_k):	1.433	-0.389	0.389	0.118	-0.118	Coarse Skewed
KURTOSIS (K):	9.551	12.97	12.97	1.082	1.082	Mesokurtic



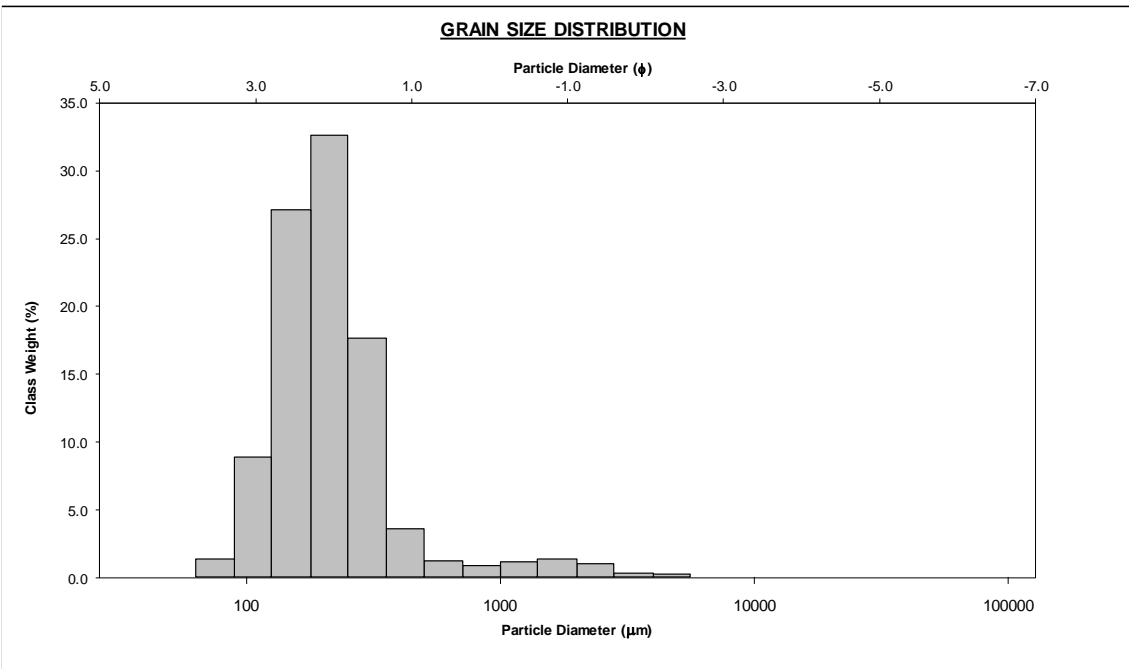
		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.1%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 22/03/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W003 Duna					TEXTURAL GROUP: Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Very Well Sorted						
SEDIMENT NAME: Very Well Sorted Fine Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 0.0%	COARSE SAND: 0.0%
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 100.0%	MEDIUM SAND: 13.2%
MODE 3:					MUD: 0.0%	FINE SAND: 86.2%
D ₁₀ :	146.2	1.876				V FINE SAND: 0.5%
AN or D ₅₀ :	207.2	2.271	V COARSE GRAVEL: 0.0%			V COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ :	272.5	2.774	COARSE GRAVEL: 0.0%			COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ / D ₁₀ :	1.863	1.479	MEDIUM GRAVEL: 0.0%			MEDIUM SILT: 0.0%
D ₉₀ - D ₁₀ :	126.2	0.898	FINE GRAVEL: 0.0%			FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.291	1.177	V FINE GRAVEL: 0.0%			V FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ - D ₂₅ :	53.05	0.368	V COARSE SAND: 0.0%			CLAY: 0.0%
		METHOD OF MOMENTS			FOLK & WARD METHOD	
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	212.4	204.8	2.288	202.1	2.307	Fine Sand
SORTING (σ):	44.80	1.242	0.313	1.262	0.336	Very Well Sorted
SKEWNESS (Sk):	0.675	-1.107	1.107	-0.102	0.102	Fine Skewed
KURTOSIS (K):	4.490	18.36	18.36	1.348	1.348	Leptokurtic



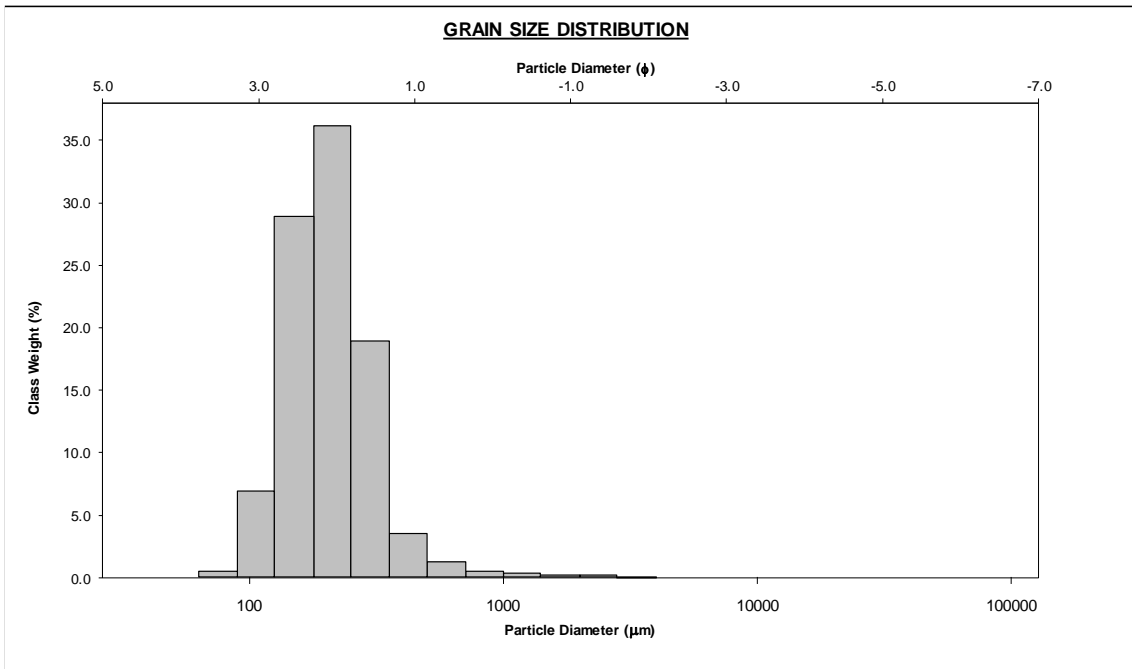
		SAMPLE STATISTICS					
SIEVING ERROR: 0.0%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 27/03/2023		
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W AM6 1/2					TEXTURAL GROUP: Slightly Gravelly Sand		
SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Well Sorted							
SEDIMENT NAME: Slightly Very Fine Gravelly Fine Sand							
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION					
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 1.2%	COARSE SAND: 2.0%	
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 96.9%	MEDIUM SAND: 22.8%	
MODE 3:					MUD: 1.8%	FINE SAND: 60.1%	
D ₁₀ :	116.9	1.519				V FINE SAND: 10.0%	
AN or D ₅₀ :	198.0	2.336			V COARSE GRAVEL: 0.0%	V COARSE SILT: 0.3%	
D ₉₀ :	348.8	3.096			COARSE GRAVEL: 0.0%	COARSE SILT: 0.3%	
D ₉₀ / D ₁₀ :	2.984	2.038			MEDIUM GRAVEL: 0.0%	MEDIUM SILT: 0.3%	
D ₉₀ - D ₁₀ :	231.9	1.577			FINE GRAVEL: 0.2%	FINE SILT: 0.3%	
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.797	1.441			V FINE GRAVEL: 1.1%	V FINE SILT: 0.3%	
D ₇₅ - D ₂₅ :	117.4	0.846			V COARSE SAND: 2.2%	CLAY: 0.3%	
		METHOD OF MOMENTS		FOLK & WARD METHOD			
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description	
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ		
MEAN (\bar{x}):	277.8	202.1	2.307	201.2	2.313	Fine Sand	
SORTING (σ):	381.1	2.054	1.038	1.618	0.694	Moderately Well Sorted	
SKEWNESS (Sk):	6.541	-0.564	0.564	0.121	-0.121	Coarse Skewed	
KURTOSIS (K):	56.81	11.60	11.60	1.225	1.225	Leptokurtic	



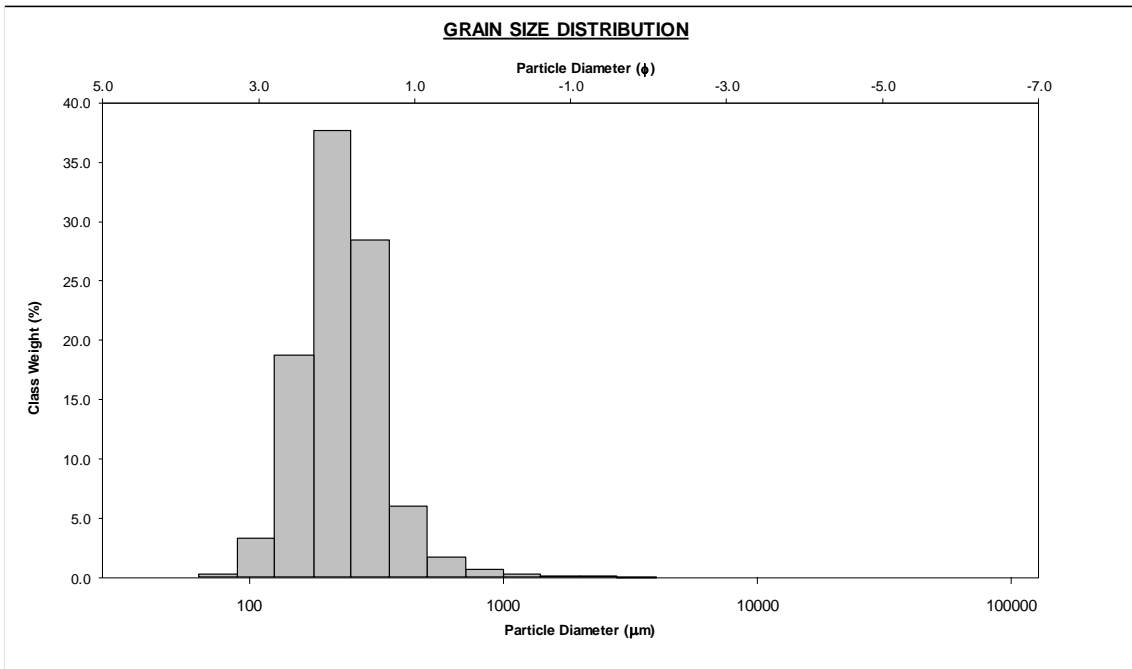
		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.2%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 27/03/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W AM7 1/2					TEXTURAL GROUP: Slightly Gravelly Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Sorted						
SEDIMENT NAME: Slightly Very Fine Gravelly Fine Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 1.6%	COARSE SAND: 2.1%
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 96.6%	MEDIUM SAND: 21.7%
MODE 3:					MUD: 1.9%	FINE SAND: 60.3%
D ₁₀ :	116.5	1.499				V FINE SAND: 9.9%
AN or D ₅₀ :	198.3	2.334	V COARSE GRAVEL: 0.0%			V COARSE SILT: 0.3%
D ₉₀ :	353.7	3.102	COARSE GRAVEL: 0.0%			COARSE SILT: 0.3%
D ₉₀ / D ₁₀ :	3.037	2.069	MEDIUM GRAVEL: 0.0%			MEDIUM SILT: 0.3%
D ₉₀ - D ₁₀ :	237.3	1.603	FINE GRAVEL: 0.3%			FINE SILT: 0.3%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.792	1.439	V FINE GRAVEL: 1.3%			V FINE SILT: 0.3%
D ₇₅ - D ₂₅ :	116.9	0.842	V COARSE SAND: 2.5%			CLAY: 0.3%
		METHOD OF MOMENTS		FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	291.8	204.5	2.290	201.9	2.308	Fine Sand
SORTING (σ):	426.9	2.119	1.083	1.681	0.749	Moderately Sorted
SKEWNESS (S_k):	6.148	-0.370	0.370	0.166	-0.166	Coarse Skewed
KURTOSIS (K):	49.70	10.80	10.80	1.397	1.397	Leptokurtic



		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.0%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 30/03/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W AM8					TEXTURAL GROUP: Slightly Gravelly Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Well Sorted						
SEDIMENT NAME: Slightly Very Fine Gravelly Fine Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 0.2%	COARSE SAND: 1.8%
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 99.6%	MEDIUM SAND: 23.4%
MODE 3:					MUD: 0.2%	FINE SAND: 66.7%
D ₁₀ :	128.8	1.594				V FINE SAND: 7.2%
AN or D ₅₀ :	199.8	2.324	V COARSE GRAVEL: 0.0%			V COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ :	331.3	2.957	COARSE GRAVEL: 0.0%			COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ / D ₁₀ :	2.573	1.856	MEDIUM GRAVEL: 0.0%			MEDIUM SILT: 0.0%
D ₉₀ - D ₁₀ :	202.6	1.364	FINE GRAVEL: 0.0%			FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.656	1.368	V FINE GRAVEL: 0.2%			V FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ - D ₂₅ :	100.6	0.728	V COARSE SAND: 0.6%			CLAY: 0.0%
		METHOD OF MOMENTS		FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	230.6	203.6	2.296	201.8	2.309	Fine Sand
SORTING (σ):	160.1	1.545	0.627	1.469	0.555	Moderately Well Sorted
SKEWNESS (S_k):	7.521	0.169	-0.169	0.056	-0.056	Symmetrical
KURTOSIS (K):	88.67	12.53	12.53	1.031	1.031	Mesokurtic



		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.0%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 22/03/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W AM9					TEXTURAL GROUP: Slightly Gravelly Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Well Sorted						
SEDIMENT NAME: Slightly Very Fine Gravelly Fine Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 0.1%	COARSE SAND: 2.5%
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 99.8%	MEDIUM SAND: 36.0%
MODE 3:					MUD: 0.1%	FINE SAND: 57.4%
D ₁₀ :	140.1	1.508				V FINE SAND: 3.5%
AN or D ₅₀ :	226.7	2.141	V COARSE GRAVEL: 0.0%			V COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ :	351.6	2.835	COARSE GRAVEL: 0.0%			COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ / D ₁₀ :	2.509	1.880	MEDIUM GRAVEL: 0.0%			MEDIUM SILT: 0.0%
D ₉₀ - D ₁₀ :	211.5	1.327	FINE GRAVEL: 0.0%			FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.623	1.397	V FINE GRAVEL: 0.1%			V FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ - D ₂₅ :	113.2	0.699	V COARSE SAND: 0.4%			CLAY: 0.0%
		METHOD OF MOMENTS			FOLK & WARD METHOD	
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	256.7	230.7	2.116	226.3	2.144	Fine Sand
SORTING (σ):	155.4	1.491	0.576	1.455	0.541	Moderately Well Sorted
SKEWNESS (Sk):	8.117	0.511	-0.511	0.040	-0.040	Symmetrical
KURTOSIS (K):	120.1	8.825	8.825	1.059	1.059	Mesokurtic



		SAMPLE STATISTICS				
SIEVING ERROR: 0.1%					ANALYST & DATE: Joana Miranda, 3/29/2023	
SAMPLE IDENTITY: P. Santo Perfil W AM10					TEXTURAL GROUP: Slightly Gravelly Sand	
SAMPLE TYPE: Unimodal, Well Sorted						
SEDIMENT NAME: Slightly Very Fine Gravelly Fine Sand						
		GRAIN SIZE DISTRIBUTION				
MODE 1:	μm	ϕ			GRAVEL: 0.0%	COARSE SAND: 1.2%
MODE 2:	215.0	2.237			SAND: 99.9%	MEDIUM SAND: 35.0%
MODE 3:					MUD: 0.1%	FINE SAND: 61.1%
D ₁₀ :	146.0	1.559			V COARSE GRAVEL: 0.0%	V FINE SAND: 2.4%
AN or D ₅₀ :	225.6	2.148			COARSE GRAVEL: 0.0%	V COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ :	339.4	2.776			MEDIUM GRAVEL: 0.0%	COARSE SILT: 0.0%
D ₉₀ / D ₁₀ :	2.325	1.781			FINE GRAVEL: 0.0%	MEDIUM SILT: 0.0%
D ₉₀ - D ₁₀ :	193.4	1.217			V FINE GRAVEL: 0.0%	FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ / D ₂₅ :	1.527	1.338			V COARSE SAND: 0.2%	V FINE SILT: 0.0%
D ₇₅ - D ₂₅ :	98.49	0.611				CLAY: 0.0%
		METHOD OF MOMENTS		FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	245.8	227.6	2.135	227.7	2.135	Fine Sand
SORTING (σ):	107.5	1.415	0.501	1.384	0.469	Well Sorted
SKEWNESS (Sk):	8.241	-0.558	0.558	0.019	-0.019	Symmetrical
KURTOSIS (K):	177.0	14.90	14.90	1.038	1.038	Mesokurtic

