

**Ciências
ULisboa**

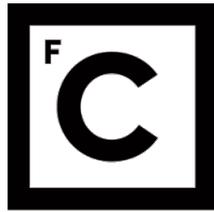
**Técnicas de teledeteção de alta resolução aplicadas à
monitorização 3D de arribas litorais: adequabilidade,
modelação da informação e resultados**

Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação
Especialidade em Engenharia Geográfica

Rita Martins Henriques Matildes

Tese orientada por:
Professora Doutora Paula Redweik
Professor Doutor Fernando Marques

Documento especialmente elaborado para a obtenção do grau de doutor



**Ciências
ULisboa**

**Técnicas de teledeteção de alta resolução aplicadas à
monitorização 3D de arribas litorais: adequabilidade,
modelação da informação e resultados**

Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação
Especialidade em Engenharia Geográfica

Rita Martins Henriques Matildes

Tese orientada por:
Professora Doutora Paula Redweik
Professor Doutor Fernando Marques

Júri:

Presidente:

- Doutor João Carlos da Costa Catalão Fernandes

Vogais:

- Doutor José Juan de Sanjosé Blasco
- Doutor José Alberto Alvares Pereira Gonçalves
- Doutor Cesar Augusto Canelhas Freire de Andrade,
- Doutora Paula Maria Ferreira de Sousa Cruz Redweik
- Doutor Fernando Manuel Silva da Fonseca Marques
- Doutor João Manuel Calvão Rodrigues

Documento especialmente elaborado para a obtenção do grau de doutor

Fundação para a Ciência e Tecnologia, no âmbito da Bolsa de Doutoramento com a referência
SFRH/BD/72744/2010

Resumo

A costa continental portuguesa estende-se ao longo de cerca de 1000 km e caracteriza-se por zonas de praias de areia intercaladas por arribas rochosas. Todo o litoral alberga importantes atividades económicas, sendo uma região de constante crescimento populacional e consequente pressão paisagística.

O conhecimento acerca dos fenómenos erosivos que atuam no litoral reveste-se cada vez de maior importância devido à utilização intensiva destas zonas. Tanto no litoral arenoso baixo como no litoral rochoso de arriba, a erosão reflete-se no recuo da linha de costa. No litoral arenoso esse recuo é muito visível por se refletir na diminuição das faixas arenosas disponíveis, em alguns locais atuando sobre estruturas de apoio às atividades balneares e mesmo já sobre alguma ocupação urbana. No litoral rochoso de arriba, a erosão provoca igualmente o recuo do terreno mas, neste caso, através de queda de material da crista e faces das arribas, eventos que, ao longo dos diversos setores costeiros de arriba, ocorrem com uma distribuição não homogénea no espaço e no tempo.

Esta expressão do fenómeno de movimentos de vertente em arribas torna a compreensão do seu comportamento num tema de investigação complexo, que tem de lidar com muitas variáveis, desde as ligadas à morfologia das arribas onde se inclui o seu declive acentuado, muitas vezes vertical, a fatores externos como eventos meteorológicos extremos e atuação da agitação marítima, até fatores intrínsecos como a natureza e estrutura dos materiais geológicos. Por este motivo, a literatura científica sobre instabilidades em arribas rochosas continua a ser reduzida. No entanto, nos últimos anos tem sido desenvolvido um trabalho mais aprofundado sobre esta temática, principalmente na área das técnicas de deteção remota para monitorização das arribas, em particular a aplicação de fotogrametria terrestre e aérea, e *laser scanning*.

Neste trabalho apresentam-se as diferentes técnicas utilizadas na monitorização de arribas e faz-se uma avaliação da sua aplicabilidade, eficácia, processamento de dados, exequibilidade dentro do contexto da monitorização do litoral e dos produtos finais que podem ser derivados de cada uma. As técnicas terrestres são apresentadas em detalhe neste trabalho com base em casos de estudo no litoral oeste da costa portuguesa, verificando-se que constituem garantidamente uma mais-valia sobre os levantamentos de campo geológicos tradicionais. Foram desenvolvidas metodologias e algoritmos inovadores para automatização de cálculos de variáveis morfológicas das arribas. Os dados que se obtiveram a partir da aplicação de técnicas de elevada resolução permitiram avançar significativamente na determinação de aspetos fundamentais para a caracterização, registo e análise estatística do fenómeno de instabilidades em arribas.

As autoridades com jurisdição no litoral poderão certamente beneficiar com os resultados obtidos neste trabalho e ainda com a introdução e aplicação destas técnicas no seu fluxo de trabalho, podendo assim melhorar a fundamentação dos processos de tomada de decisão.

Palavras-chave: monitorização, monitorização 3D, técnicas terrestres, arribas litorais, nuvens de pontos.

Abstract

The Portuguese coast extends over about 1000 km and is characterized by sandy beach areas interspersed with rocky cliffs. The whole coast hosts important economic activities, being a region of constant population growth and landscape changes.

Knowledge about the erosive phenomena that act on coastlines is of high importance due to the intensive use of these areas. The effects of erosion on both low sandy and rocky cliffs coastlines are reflected in the retreat of these coastlines. In the case of the sandy coasts, this retreat is very visible due to the reduction of the available sand in beaches, and in some places, with the sea destructive action acting upon beach activities support structures and on urban areas. In the rocky cliffs coastline the erosion phenomena also causes land loss but in this case through the fall or slide of materials from cliff top and faces, events which occur with a non-homogeneous distribution in space and time over the various cliff sections of the Portuguese coastline.

This expression of the phenomena of cliff instability make the understanding of their behavior a complex research theme, which has to deal with numerous variables like those linked to the morphology of the cliffs which includes its steep slopes, external factors such as extreme weather events and direct action of sea waves, and intrinsic factors such as the nature and structure of geological materials. For this reason, the scientific literature on instabilities in rocky cliffs remains scarce. However, in recent years some work has been developed on this subject, especially in the area of remote sensing techniques for monitoring the cliffs evolution, in particular with the application of terrestrial and aerial photogrammetry and laser scanning techniques.

This work approaches the different techniques used in monitoring cliff evolution and evaluates each technique for its applicability, efficiency, data processing, feasibility within the context of monitoring and end products or deliverables that may be derived from each method. Terrestrial techniques are presented in detail based on case studies on the Portuguese west coast, which provided advantages over traditional geological field surveys. Innovative methodologies and algorithms were developed for the automatic calculation of geometric characteristics of the cliffs and of their evolution. The data obtained with the application of high resolution techniques allowed significant progress in assessing fundamental aspects for the characterization, registry and statistical analysis of the instability phenomena on coastal cliffs.

The authorities having jurisdiction on the coast will certainly benefit from the results of this work and with the introduction and application of these techniques in their workflow, enabling them with better support for their decision-making processes.

Keywords: monitoring, 3D monitoring, terrestrial techniques, coastal cliffs, point clouds.

Índice

Resumo.....	i
Abstract	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	xiii
Agradecimentos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	2
1.2 Considerações iniciais.....	6
1.3 Contribuição do trabalho.....	6
1.4 Estrutura do trabalho.....	7
2. Estado da Arte	9
3. Técnicas utilizadas na monitorização de arribas.....	13
3.1 Fotointerpretação.....	13
3.2 Fotogrametria Aérea.....	15
3.2.1 Comparação Fotointerpretação vs. Fotogrametria aérea para inventariação multi-temporal de movimentos de vertente	15
3.3 Fotogrametria Terrestre	27
3.4 <i>Laser scanning</i> Terrestre.....	32
3.5 Imagem hiperespectral.....	33
4. Metodologias e algoritmos desenvolvidos	37
4.1 Produção e processamento de nuvens de pontos.....	37
4.1.1 Definição de nuvem de pontos.....	37
4.1.2 Representação de superfícies de arriba por nuvens de pontos.....	37
4.1.3 Detecção de alterações morfológicas usando nuvens de pontos	38

4.1.4 Algoritmos para determinação de diferenças entre nuvens de pontos.....	39
4.1.5 Nuvens de diferenças: resultado da comparação de nuvens sucessivas	42
4.2 Determinação de volumes a partir de nuvens de pontos	44
4.2.1 Determinação de <i>clusters</i>	46
4.2.2 Cálculo de volumes, áreas e dimensões	51
4.3 Determinação de fatores de predisposição à ocorrência de movimentos em arribas a partir de nuvens de pontos.....	63
4.3.1 Declives.....	63
4.3.2 Exposição	63
4.3.3 Resistência dos materiais (distâncias C2M)	65
5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas.....	67
5.1. Monitorização de arribas	67
5.1.1 Levantamento.....	67
5.1.2 Comparação <i>laser scanning</i> vs. fotogrametria terrestre.....	70
5.1.3 Detecção de alterações entre épocas de observação	73
5.1.3.1 Praia da Bafureira	74
Resultados da evolução das arribas entre Março de 2012 e Outubro de 2014	78
5.1.3.2 Praia do Porto da Calada	93
Resultados da evolução das arribas entre Julho de 2012 e Julho de 2013.....	98
5.1.3.3 Praia de São Bernardino	104
Resultados da evolução das arribas entre Outubro de 2012 e Março de 2014	105
5.2 Inventariação de movimentos.....	114
5.3 Modelação de blocos rochosos.....	124
5.4 Levantamento de zonas inacessíveis.....	130
5.4.1 Orientação das imagens e geração da nuvem de pontos	137
5.4.2 Avaliação da qualidade do produto geométrico	138
Discussão	140
6. Suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas	143
6.1. Zona de estudo	144
6.2 Monitorização por fotogrametria terrestre analógica e digital: 1999 a 2014.....	145
6.2.1 Recuperação da geometria de fotografias analógicas	145
6.2.2 Processamento fotogramétrico dos levantamentos fotográficos.....	148

6.2.3	Discussão	151
6.3	Modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente	153
6.3.1	Método de Regressão Logística	153
6.3.2	Processamento de dados: atribuição de informação alfanumérica à nuvem de pontos 3D	155
6.3.2.1	Unidades de terreno	155
6.3.2.2	Inventário de movimentos	156
6.3.2.3	Fatores de predisposição	156
o	<i>Cotas</i>	156
o	<i>Litologia</i>	156
o	<i>Declives</i>	157
o	<i>Rugosidade</i>	157
6.3.3	Modelação da suscetibilidade	157
	Caso 1: Inventário de movimentos 1999-2014, nuvem de pontos 3D de 2014, fatores de predisposição iniciais	160
	Caso 2: Inventário de movimentos 1999-2014, nuvem de pontos 3D 2014, fatores de predisposição melhorados	164
o	<i>Cota da base da arriba</i>	164
7.	Considerações finais	173
	Referências por Capítulo	185
1.	Introdução	185
2.	Estado da Arte	187
3.	Técnicas utilizadas na monitorização de arribas	192
4.	Metodologias e algoritmos desenvolvidos	194
5.	Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas	196
6.	Suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas	198
7.	Considerações finais	199
	Software utilizado	201
	Cartografia e informação geológica, Cartas Geológicas e respetivas Notícias Explicativas	203
	ANEXO	205

Índice de Figuras

<i>Figura 1 – Identificação do litoral de arriba a estudar por fotogrametria aérea, com sinalização das zonas críticas, de acordo com a APA, I.P. (ARH Tejo) (fonte: Marques et al., 2013).</i>	3
<i>Figura 2 – Localização das praias prioritárias para levantamentos com técnicas terrestres.</i>	4
<i>Figura 3 – Desenho esquemático de elementos geológicos e geomorfológicos por fotointerpretação.</i>	14
<i>Figura 4 – Detecção de movimento de grandes dimensões por comparação visual de fotografias aéreas oblíquas (fonte: portal SIARL).</i>	14
<i>Figura 5 – Estereoscópio de mesa montado sobre um monitor onde está visível um par estereoscópico digital.</i>	16
<i>Figura 6 – Enquadramento geográfico da região em estudo.</i>	17
<i>Figura 7 - Linhas de Crista e Sopé delineadas em ambiente GIS (A) e exemplo da sua identificação no terreno (norte da Praia Azul) (B).</i>	20
<i>Figura 8 - Exemplos de ocupação de estruturas antrópicas no setor Litoral de Torres Vedras. Estrada de acesso a praia junto à Praia da Amoreira (A); Estrada de alcatrão com acesso à Praia de Santa Cruz com edifício construído no talude (B).</i>	21
<i>Figura 9 – Esquerda: Diferenças entre a delimitação da crista da arriba em 2002, por fotointerpretação, e 2010 por estereorrestituição. Neste local não se verificou recuo da crista da arriba, pelo que se está perante um erro de interpretação da morfologia por parte do operador de restituição. Direita: local onde a delimitação das cristas de arriba coincidem, num local sem registo de movimentos, mas onde é visível o maior detalhe na definição da crista pela estereorrestituição.</i>	22
<i>Figura 10 – Distanciamento entre linhas representativas da crista da arriba por fotointerpretação e fotogrametria ao longo de todo o setor litoral estudado.</i>	23
<i>Figura 11 - Frequência dos valores de afastamento calculado pela ferramenta Near entre as duas linhas de crista.</i>	23
<i>Figura 12 - Diferenças nos resultados das duas técnicas: entre o pormenor de definição da crista da arriba e na definição geométrica do movimento registado.</i>	24
<i>Figura 13 - Distribuição das áreas perdidas na crista da arriba como registadas por fotointerpretação e por estereorrestituição. Os valores mínimos de área perdida registados nas cristas da arriba são de 2.84 e 3.31 m², por fotointerpretação e estereorrestituição, respetivamente, e os valores máximos de área perdida registados nas cristas da arriba são de 538.99 e 601.71 m², também por fotointerpretação e estereorrestituição, respetivamente.</i>	24
<i>Figura 14 – Padrão de alvos de calibração do software Photomodeler Scanner.</i>	28
<i>Figura 15 - Recuo necessário à cobertura integral da altura total da arriba numa imagem e a resolução geométrica das imagens obtidas.</i>	29
<i>Figura 16 – Diferenças entre uma imagem original e a mesma imagem corrigida das distorções da lente.</i>	30
<i>Figura 17 - Layout do levantamento fotogramétrico da fachada de uma arriba.</i>	30
<i>Figura 18 – Cubo hiperespectral formado por todas as bandas da câmara hiperespectral experimentada na praia da Bafureira.</i>	35
<i>Figura 19 – Classificação automática da imagem hiperespectral com a conjugação de 3 bandas.</i>	35
<i>Figura 20 – Estrutura em octree: divisão sucessiva de cubos em 8 cubos cada e codificação do cubo indicado (031) (Girardeau-Montaut et al., 2005).</i>	40

<i>Figura 21- Esquema de cálculo da distância utilizando o algoritmo C2C (adaptado de Girardeau-Montaut et al., 2005).</i>	40
<i>Figura 22 – Esquema de processamento do algoritmo M3C2 no cálculo das distâncias entre duas nuvens de pontos: a) cálculo da normal N no ponto i, na escala D (adaptado de Lague et al., 2013); b) LM3C2 representa a distância medida entre i_1 e i_2, sendo a rugosidade aparente de cada nuvem, σ_1 e σ_2, calculada ao longo do vetor normal N (adaptado de Barnhart e Crosby, 2013).</i>	41
<i>Figura 23– Aplicação do algoritmo M3C2 em morfologias complexas de rugosidade elevada: consequências da subestimação da escala D aplicada no cálculo de distâncias entre duas nuvens de elevada rugosidade – sobrestimação da distância ou lacunas de informação (adaptado de Lague et al., 2013)</i>	42
<i>Figura 24 – Cabeçalho indicativo da informação constante no ficheiro de output do algoritmo C2C.</i>	43
<i>Figura 25 - Cabeçalho indicativo da informação constante no ficheiro de output do algoritmo M3C2.</i>	44
<i>Figura 26 – Exemplo de uma superfície irregular na praia de Valmitão, onde ao mesmo ponto X, Y correspondem vários valores de Z: em cima) imagem de uma face irregular, obtida para processamento fotogramétrico; no centro) nuvem de pontos 3D gerada por correlação de imagens do levantamento fotogramétrico realizado; em baixo) perfil transversal (correspondente ao traçado a laranja na figura do centro) onde se verifica a ocorrência de irregularidades que geram, para o mesmo ponto X,Y, vários valores de Z (Z1, Z2 e Z3).</i>	45
<i>Figura 27 – a) Cálculo da distância entre pontos com a função pdist (exemplo a 2D); b) Agrupamento dos pontos tendo como critério a menor distância euclidiana, usando a função linkage (fonte: MathWorks, 2015).</i>	47
<i>Figura 28 – Dendrograma, ou árvore binária de clusters (fonte: MathWorks, 2015).</i>	48
<i>Figura 29- A aplicação de diferentes valores de cutoff originam diferentes quantidades de clusters e número de pontos associados, influenciando o que é considerado zona de alteração e respetivo volume a ser determinado: c = 5 gerou 53 clusters, enquanto que c = 3 gerou 91 clusters</i>	49
<i>Figura 30 – Assumindo que as três manchas assinaladas a azul claro correspondem a movimentos individuais, verifica-se que a quantidade de clusters definidos é superior. Verifica-se no exemplo do movimento caracterizado pelos lds 4, 71 e 94 que, apesar do somatório dos volumes ser efetivamente o volume envolvido no movimento, ele é representado por 3 clusters individuais.</i>	49
<i>Figura 31 – α-shape como polígono que engloba a totalidade dos pontos de cada cluster e define a área de interpolação.</i>	52
<i>Figura 32 – Representação gráfica da grelha criada, onde foram interpolados os valores de distâncias M3C2 e a α-shape 2D que representa a fronteira do cluster de pontos que são considerados no cálculo final dos volumes.</i>	53
<i>Figura 33 – a) Distribuição dos pontos que formam a α-shape: a amarelo, os pontos projetados do cluster no plano à cota 0, a azul, os mesmos pontos com cota M3C2 e; b) Perspetiva no plano de melhor ajuste dos pontos projetados do cluster com cota M3C2 e no plano; c) e d) Duas perspetivas da α-shape gerada a partir dos dois conjuntos de pontos.</i>	54
<i>Figura 34 - Cartografia de volumes ganho e perdido na escarpa da praia do Porto da Calada entre Junho de 2012 e Julho de 2013.</i>	55
<i>Figura 35 - α-shape 2D criada a partir dos pontos projetados no plano e os parâmetros altura e largura associados.</i>	56
<i>Figura 36 – Representação espacial das componentes distância (r), elevação (el) e azimute (az) num equipamento laser scanner terrestre (adaptado de Leica Geosystems).</i>	57
<i>Figura 37 – Tetraedro modelo utilizado para determinar a precisão associada ao cálculo de volumes de um objeto através da αshape.</i>	59

<i>Figura 38 – Em cima: imagem de uma zona côncava da arriba norte de Ribeira de Ilhas; Em baixo: excerto da nuvem de pontos classificada de acordo com os valores de declive.</i>	64
<i>Figura 39 – Determinação do ângulo de exposição através das componentes N_x e N_y da normal e pela função inversa do seno (arcsen).</i>	64
<i>Figura 40 – A distância a um plano médio da arriba (a vermelho, tracejado) por filtragem das irregularidades mais finas (altas frequências) revela a resistência dos materiais à erosão.</i>	65
<i>Figura 41 – Superfície filtrada da arriba calculada por triangulação com base numa nuvem de resolução de 2.5m.</i>	65
<i>Figura 42 – Nuvem de referência onde a cada ponto está associada a distância à superfície da arriba filtrada de altas frequências.</i>	66
<i>Figura 43 – Comparação entre nuvem de TLS e nuvem de FT com localização das estações de varrimento E1, E2 e E3, que distavam cerca de 47m, 36m e 38m à arriba, respetivamente.</i>	71
<i>Figura 44 - Superfície 3D modelada a partir da nuvem de pontos e texturizada a partir das fotografias obtidas para processamento fotogramétrico: esta informação é 3D pois cada pixel tem as 3 coordenadas.</i>	73
<i>Figura 45 – Ocupação dos blocos rochosos na base da arriba para uso balnear.</i>	74
<i>Figura 46 - Enquadramento geológico e morfológico das arribas da praia da Bafureira: β - filão de rocha basáltica, C1Ro - Formação de Rodízio (pelitos, arenitos e conglomerados), C2Cn – Formação de Caneças (rochas calcárias e areníticas); polígono a vermelho delimita a zona da face das arribas.</i>	75
<i>Figura 47 - Plano esquemático do posicionamento do laser scanner para varrimento da Praia da Bafureira.</i>	76
<i>Figura 48 – Desvios entre as duas nuvens de pontos obtidas com laser scanner em 2012 e 2014, calculadas com o algoritmo C2C.</i>	77
<i>Figura 49 – Diferenças entre a época TLS0 e época TLS2, após registo da nuvem TLS2 sobre a TLS 0 com base numa amostra de 200 mil pontos.</i>	78
<i>Figura 50 - Nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 com as nuvens de TLS0 e TLS2 (27/03/2012 e 07/04/2014) na arriba da praia da Bafureira.</i>	80
<i>Figura 51 - Nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa –(a vermelho superior a 95% de confiança).</i>	80
<i>Figura 52- Clusters de alterações correspondentes a perda de material (a vermelho zonas de alteração positiva, ou de ganho de volume, causada por existência de vegetação), calculados automaticamente com o programa VOLTERRE.</i>	81
<i>Figura 53 – Exemplo de bloco caído entre épocas de observação, detetado como alteração na nuvem de pontos.</i>	81
<i>Figura 54 – Divisão do segmento em estudo em sectores de menor dimensão.</i>	82
<i>Figura 55 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 1 entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).</i>	83
<i>Figura 56 - Sector 1: cartografia de material movimentado entre FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).</i>	83
<i>Figura 57 – Exemplo de bloco detetado pelo algoritmo M3C2, verificado por comparação entre as imagens das duas datas que fecham o intervalo temporal de deteção de alterações FT0-FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).</i>	84
<i>Figura 58 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 2 entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).</i>	84
<i>Figura 59 - Sector 2: cartografia de material movimentado entre as épocas entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).</i>	85

<i>Figura 60 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 3 entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013) (assinalado na imagem a zona de recuo local máximo de 2.98 m).</i>	85
<i>Figura 61 - Sector 3: cartografia de material movimentado entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).</i>	86
<i>Figura 62 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 1 entre as épocas FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).</i>	86
<i>Figura 63 - Sector 1: cartografia de material movimentado entre FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).</i>	87
<i>Figura 64 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 2 entre as épocas FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).</i>	87
<i>Figura 65 – Sector 2: cartografia de material movimentado entre FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).</i>	88
<i>Figura 66 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 3 entre as épocas FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).</i>	88
<i>Figura 67 – Sector 3: cartografia de material movimentado entre FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).</i>	89
<i>Figura 68 – Exemplo de perda de material no topo da arriba, visível por comparação de imagens originais do levantamento fotogramétrico.</i>	89
<i>Figura 69 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 1 entre as épocas FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).</i>	90
<i>Figura 70 - Sector 2: cartografia de material movimentado entre FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).</i>	90
<i>Figura 71 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 2 entre as épocas FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).</i>	91
<i>Figura 72 - Sector 2: cartografia de material movimentado entre FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).</i>	91
<i>Figura 73 – Queda de blocos na praia da Bafureira, ocorrida a 10/10/2014.</i>	92
<i>Figura 74 - Sector 3: Evolução entre FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).</i>	92
<i>Figura 75 – Sector 3: Cartografia de áreas de volumes deslocados por queda de blocos a 10/10/2014.</i>	93
<i>Figura 76 - Enquadramento das arribas da praia do Porto da Calada.</i>	94
<i>Figura 77 – Subdivisão da praia do Porto da Calada em sectores: 1) Arriba N, 2) Arriba N central, 3) Talude da estrada e 4) Arriba S.</i>	95
<i>Figura 78 – Exemplo da intervenção para estabilização de zonas instáveis na arriba Sul: saneamento de blocos instáveis, colocação de rede metálica tensionada em cortina e plataforma de retenção escavada nos depósitos de vertente (GeoÁrea, 2011). Imagens de Sónia Queiroz, 19/03/2014.</i>	96
<i>Figura 79 - Enquadramento geológico e morfológico das arribas da praia do Porto da Calada: Formação de Porto Calada (C 1 PC), a Formação de Vale de Lobos (C 1 VL), Formação de São Lourenço e de Santa Susana indiferenciadas (C 1 LS) e Formação de Freixial (J 3 Fr); polígono a vermelho delimita a zona da face das arribas.</i>	96
<i>Figura 80 – Estacionamento do laser scanner e preparação de material para levantamento do talude da estrada.</i>	97
<i>Figura 81 - Esquema de levantamento com laser scanner na Praia do Porto da Calada.</i>	97
<i>Figura 82 - Nuvem de pontos 3D obtida por varrimento com laser scanner, com radiometria associada.</i>	98
<i>Figura 83 – Nuvem de diferenças absolutas da zona do talude da estrada, onde se apresentam as alterações ocorridas entre as duas épocas de observação por laser scanner terrestre.</i>	99
<i>Figura 84 - Caso A: Alterações detetadas por diferença entre nuvens de pontos de duas épocas, confirmadas por comparação de imagens de levantamentos fotogramétricos realizados; Caso B: Na zona superior da estrada de acesso ao parque de estacionamento não foram detetadas diferenças na comparação entre nuvens de pontos e as imagens de levantamentos fotogramétricos realizados confirmam a inexistência de</i>	

<i>alterações entre as duas épocas. Caso C: Situação mais complexa de perda de material e acumulação de detritos na base, com aparecimento de vegetação entre as duas épocas de observação.</i>	100
<i>Figura 85 – Em cima: nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 na arriba Norte da praia do Porto da Calada; em baixo: nuvem de pontos classificada de acordo com a distância significativa (a vermelho - superior a 95% de confiança).</i>	101
<i>Figura 86 - Nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 no talude de acesso à praia do Porto da Calada.</i>	102
<i>Figura 87 – Nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa (a vermelho-superior a 95% de confiança).</i>	102
<i>Figura 88 – Em cima: nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 na arriba Norte da praia do Porto da Calada; em baixo: nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa (a vermelho-superior a 95% de confiança).</i>	103
<i>Figura 89 – Enquadramento geográfico das arribas da praia de São Bernardino (fonte de imagem: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community).</i>	104
<i>Figura 90 – Caracterização geológica das arribas da zona de São Bernardino: Formação de Alcobaça (J3A1) (fonte Marques et al., 2013)</i>	105
<i>Figura 91 – Aspeto das arribas da praia de São Bernardino: arriba ativa (em cima) e talude de acesso ao areal (em baixo).</i>	105
<i>Figura 92 - Captura de imagens antes e depois da queda de blocos. A seta assinala a zona de onde a massa foi deslocada.</i>	107
<i>Figura 93 – Nuvens de pontos antes e depois da queda de blocos ocorrida no talude monitorizado.</i>	108
<i>Figura 94 - Nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 no talude da praia de São Bernardino.</i>	109
<i>Figura 95 - nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa (a vermelho-superior a 95% de confiança).</i>	110
<i>Figura 96 – Nuvem de diferenças, sem classificação atribuída, com os clusters de material perdido assinalados a azul.</i>	110
<i>Figura 97 – Sequência de imagens do levantamento fotogramétrico representativa da alteração ocorrida entre duas épocas de observação.</i>	111
<i>Figura 98 – Nuvem de pontos tridimensional com textura fotográfica, a ser alvo de deteção e análise de alterações.</i>	112
<i>Figura 99 – Nuvem de diferenças calculada com as nuvens de pontos representativas das duas épocas de observação 1 e 2 (30/11/2012 e 18/03/2014).</i>	112
<i>Figura 100 – Nuvem de diferenças classificada de acordo com a significância do cálculo de distâncias (a vermelho, superior a 95%).</i>	113
<i>Figura 101 – Nuvem de pontos original com os clusters de volume perdido e acumulado, como calculado pelo programa VOLTERRE.</i>	113
<i>Figura 102 – Levantamento total da Praia da Calada: nuvens classificadas de acordo com a intensidade (tons de cinzento de claro para escuro, diminuição da intensidade de retorno de sinal).</i>	115
<i>Figura 103 - Cartografia de volumes perdidos na arriba Norte da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013, com movimentos individualmente identificados e caracterizados (Tabela 8).</i>	116
<i>Figura 104 - Caracterização litológica da arriba Norte da praia do Porto da Calada.</i>	117
<i>Figura 105 - Cartografia de volumes ganhos e perdidos na escarpa Leste - Talude da Estrada - da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013.</i>	120

<i>Figura 106 - Cartografia de volumes perdidos na escarpa Leste - Talude da Estrada - da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013, com movimentos individualmente identificados e caracterizados (Tabela 9).</i>	120
<i>Figura 107 – Caracterização litológica do talude de acesso à praia do Porto da Calada.</i>	121
<i>Figura 108 - Cartografia de volumes ganhos e perdidos na arriba Sul da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013.</i>	122
<i>Figura 109 - Cartografia de volumes perdidos na arriba Sul da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013, com movimentos individualmente identificados e caracterizados.</i>	122
<i>Figura 110 - Caracterização litológica da arriba Sul da praia da Calada.</i>	123
<i>Figura 111 – Percentagem de movimentos ocorridos por litologia.</i>	124
<i>Figura 112 – Em cima, imagem original do levantamento fotogramétrico para estabelecimento da Época 0; em baixo: levantamento fotogramétrico após queda de blocos a 30/11/2012 – Época 1.</i>	125
<i>Figura 113 – Imagem do levantamento fotogramétrico após nova queda de blocos– Época 2.</i>	126
<i>Figura 114 – Bloco depositado na estrada de acesso ao areal, proveniente do talude – queda de blocos a 30/11/2012.</i>	127
<i>Figura 115 – Superfície da face do talude, modelada a partir da nuvem de pontos de diferenças.</i>	127
<i>Figura 116 – Esquema de cálculo de volume entre duas superfícies usando a ferramenta Surface Volume (ArcGIS 120.3) (Adaptado de ESRI: http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/java/gp_toolref/3d_analyst_tools/how_surface_volume_3d_analyst_works.htm).</i>	127
<i>Figura 117 – Bloco rochoso de grandes dimensões, com fita métrica para atribuição de escala ao modelo.</i>	128
<i>Figura 118 – Nuvem de pontos do bloco modelado com posições de obtenção das imagens originais.</i>	129
<i>Figura 119 – Modelação fotogramétrica do bloco e imagem da α-shape correspondente.</i>	129
<i>Figura 120 – Cobertura fotogramétrica do bloco.</i>	130
<i>Figura 121 – Perspetiva da arriba vista da câmara GoPro Hero 2 montada no parapente.</i>	132
<i>Figura 122 – Enquadramento geográfico das praias do Magoito e Azenas do Mar (fonte das imagens: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community).</i>	132
<i>Figura 123 – Nuvem de pontos obtida com o VisualSFM, a partir das imagens da GoPro.</i>	133
<i>Figura 124 – Esquerda: imagem tiff original extraída do video MPEG-4; Direita: a mesma imagem corrigida das distorções da lente.</i>	134
<i>Figura 125 - Esquerda: frame da GoPro Hero 2, apresentando forte distorção em barril; Direita: a mesma área capturada com uma câmara DSLR.</i>	135
<i>Figura 126 - Efeito do obturador de rolamento, top-down, em objetos verticais com câmara em movimento. (adaptado de Chang et al. 2005).</i>	135
<i>Figura 127 -Esquerda: imagem original do campo de calibração; Direita: esquema 3D dos alvos e posições da câmara na calibração.</i>	136
<i>Figura 128 - Modelação da distorção radial (a vermelho) e a respetiva incerteza (em azul).</i>	136
<i>Figura 129 - Imagem corrigida das distorções da lente: linhas a preto salientam a junção dos mosaicos, como linhas retas.</i>	137
<i>Figura 130 - Nuvem de pontos obtida com as imagens da GoPro Hero 2 (≈60% do sector Magoito-Aguda).</i>	138
<i>Figura 131 – Posições da câmara e perspetivas das imagens ao longo da sequência de vídeo, mostrando a divisão (a vermelho) entre as perspetivas favorável e desfavorável.</i>	138
<i>Figura 132 - Distâncias absolutas entre a nuvem de pontos obtida com a GoPro e a nuvem de referência.</i>	139

<i>Figura 133 – Histograma das diferenças absolutas entre as duas nuvens de pontos.</i>	140
<i>Figura 134 – Enquadramento da zona de estudo (fonte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community) e imagem panorâmica no local (S. Queiroz, 2011)</i>	145
<i>Figura 135 – Pormenor de um ponto imutável ao longo do período de análise, comum às 4 épocas de observação, definido como ponto fotogramétrico e coordenado no terreno.</i>	147
<i>Figura 136 – Exemplo de enquadramento das imagens na fiada do levantamento de 2003: os limites das imagens estão representados a tracejado vermelho intercalado com tracejado preto em imagens sequenciais..</i>	149
<i>Figura 137 – Nuvens de pontos de 1999 com lacuna de informação entre pares estereoscópicos que lhes deram origem.</i>	149
<i>Figura 138 – Nuvens de pontos de 2000: à esquerda - nuvem final, resultante da união das nuvens individuais; à direita - pormenor do desfasamento entre duas nuvens de pontos 3D correspondentes à mesma zona da face da arriba.</i>	150
<i>Figura 139 – Pares processados de 2003: Esquema da posição da câmara, limites das imagens já orientadas e distribuição dos pontos fotogramétricos.</i>	150
<i>Figura 140 – Em cima: nuvem de pontos 3D classificada de acordo com as diferenças calculadas entre 2003 e 2014 com o algoritmo M3C2 (caso a e caso b); Ao centro e em baixo: diferenças observáveis nas imagens RGB das duas épocas.</i>	152
<i>Figura 141 – Cartografia sobre nuvem de pontos 3D dos movimentos ocorridos entre 1999 e 2014 e dos fatores de predisposição (Trimble RealWorks).</i>	159
<i>Figura 142 - Curva ROC do modelo produzido com a correspondente área abaixo da curva, para o Caso 1 (a verde, a reta para o modelo aleatório).</i>	163
<i>Figura 143 – Classificação da nuvem de pontos 3D em função da cota da base da arriba, em faixas de 2 m na base.</i>	164
<i>Figura 144 - Curva ROC do modelo produzido com a correspondente área abaixo da curva (a verde, a reta para o modelo aleatório).</i>	167
<i>Figura 145 - Nuvem de pontos de referência de 2014 com os pontos afetados por movimentos datados de 1999 a 2014 selecionados: 50492 pontos de um total de 406981.</i>	170
<i>Figura 146 – Classificação dos pontos 3D da nuvem de referência pela probabilidade de ocorrência de movimentos calculada pelo modelo estatístico 1 (AAC = 0.69).</i>	170
<i>Figura 147 – Em cima: classificação dos pontos 3D da nuvem de referência pela probabilidade de ocorrência de movimentos calculada pelo modelo estatístico 2 (AAC = 0.737); Em baixo: movimentos registados entre 1999 e 2014 sobrepostos à classificação por probabilidade de ocorrência de movimentos calculada pelo mesmo modelo estatístico 2.</i>	171
<i>Figura 148 – Reflexos da rede metálica sobreposta à superfície do talude impedem a geração da nuvem de pontos por correlação automática de imagem.</i>	177
<i>Figura 149 – Diferença na qualidade das imagens utilizadas para texturização da nuvem de laser scanner e imagem obtida de perto da posição do laser scanner com uma Nikon D80.</i>	180
<i>Figura 150 – Diferença na qualidade de imagem nas nuvens de pontos texturizadas com imagens obtidas por câmara fotográfica incorporada no laser scanner (em cima) e nuvem de pontos calculada por correlação automática de imagem e texturizada com as imagens do levantamento fotogramétrico (em baixo).</i>	180
<i>Figura 151 - Mapa web de enquadramento das 10 praias trabalhadas.</i>	207
<i>Figura 152 – Carregamento da web scene 3D dentro da aplicação web: são carregados os dados em formato 3D.</i>	208

<i>Figura 153 - Web scene 3D de nuvem de pontos e movimentos detetados entre 2012 e 2013 no talude de acesso à praia do Porto da Calada, em formato 3D, com possibilidade de visualizar nuvem de pontos da arriba e/ou movimentos.</i>	208
<i>Figura 154 - Possibilidade de inquirição aos dados e consulta de atributos das camadas de informação.</i>	209
<i>Figura 155 - Web scene 3D de nuvem de pontos e movimentos detetados, com especial enfoque no streaming de vídeo da camara da praia de São Pedro do Estoril (https://beachcam.sapo.pt/).</i>	210

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Características gerais das coberturas aéreas disponíveis para a área de abrangência do projeto CISML.</i>	2
<i>Tabela 2 – Características gerais dos levantamentos por técnicas terrestres nas praias prioritárias.</i>	5
<i>Tabela 3 – Resultados da calibração da câmara Nikon D80 com uma objetiva Samyang.</i>	29
<i>Tabela 4 – Especificações dos laser scanners terrestres utilizados.</i>	33
<i>Tabela 5 – Características dos levantamentos com laser scanner na Praia da Bafureira</i>	76
<i>Tabela 6 - Características dos levantamentos fotogramétricos terrestres na Praia da Bafureira</i>	79
<i>Tabela 7 – Taxa de recuo médio anual para a praia da Bafureira</i>	93
<i>Tabela 8 – Características dos movimentos (volumes perdidos) definidos por clusters na arriba Norte da praia do Porto da Calada.</i>	115
<i>Tabela 9 - Características dos movimentos (volumes perdidos) definidos por clusters no Talude da Estrada da praia do Porto da Calada</i>	118
<i>Tabela 10 - Características dos movimentos (volumes perdidos) definidos por clusters na arriba Sul da praia do Porto da Calada.</i>	119
<i>Tabela 11 – Taxa de recuo médio anual para os três setores da Praia do Porto da Calada.</i>	124
<i>Tabela 12 - Resultados da calibração da objetiva</i>	136
<i>Tabela 13 – Informação sobre câmara utilizada em cada levantamento e número de fotos a incluir no processamento fotogramétrico.</i>	146
<i>Tabela 14 – Resultados finais do processamento fotogramétrico e geração de nuvens de pontos.</i>	151
<i>Tabela 15 – Classificação dos fatores de predisposição e correspondente percentagem na nuvem.</i>	160
<i>Tabela 16 - Tabela de Classificação^{a,b}</i>	161
<i>Tabela 17 - Testes de coeficientes de modelo Omnibus</i>	161
<i>Tabela 18 – a) Resumo do modelo</i>	162
<i>Tabela 19 - Tabela de Classificação - Genérica</i>	162
<i>Tabela 20 - Tabela de Classificação</i>	162
<i>Tabela 21 - Área sob a curva</i>	163
<i>Tabela 22 – Classificação dos fatores de predisposição e correspondente percentagem na nuvem.</i>	164
<i>Tabela 23 – Tabela de classificação geral do modelo.</i>	166
<i>Tabela 24 – Área abaixo da curva ROC.</i>	167
<i>Tabela 25 – AAC calculada para cada fator de predisposição individualmente.</i>	168
<i>Tabela 26 – Contribuição de cada fator para o aumento da qualidade do modelo</i>	168
<i>Tabela 27 – Resumo dos volumes perdidos, por sector e por épocas de observação, na praia da Bafureira.</i>	176

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da atribuição de uma bolsa de Doutoramento com a referência SFRH/BD/72744/2010. Foi também parcialmente financiado pelo projeto “Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo”, adjudicado à Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa pela Agência Portuguesa do Ambiente, I.P./Administração da Região Hidrográfica do Tejo e financiado pelo QREN, atribuído pelo POVT (Operação POVT-12-0233-FCOES-000034).

São devidos agradecimentos ao Instituto Dom Luiz, ao Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia e ao Departamento de Geologia, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e ao ex-Centro de Geologia, pelo acolhimento e cedência de equipamento imprescindível à realização do trabalho desenvolvido.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor José Juan Sanjosé Blasco e à equipa do GETECO, da Escuela Politécnica de Cáceres, Universidad de Extremadura (UEx), pelos levantamentos com *laser scanner* na praia da Bafureira. Ao Professor Doutor Pablo Martinez, por me receber durante a minha estadia na UNEX e me orientar na experimentação da câmara hiperespectral. A todos agradeço também o caloroso acolhimento durante este tempo.

Ao Dr. Celso Pinto (APA, I.P.) agradeço a sua boa vontade em partilhar a sua vasta experiência na monitorização de litoral de arriba, a disponibilização de informação e a comunicação dos eventos ocorridos no litoral em estudo, durante o período de monitorização.

Por fim, aos meus orientadores Professora Doutora Paula Redweik e Professor Doutor Fernando Marques, por guiarem estes 5 anos de trabalho com ideias, sugestões, correções e pelo apoio. Sem eles este trabalho não chegaria a bom porto.

1. Introdução

As zonas costeiras são consideradas segmentos estratégicos pela sua importância a nível ambiental, económico e cultural, pelo que existe a necessidade de intensificar as medidas de salvaguarda dos riscos naturais na faixa costeira, refletida na Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira (ENGIZC). Dada a grande suscetibilidade a fenómenos erosivos, muitas vezes com prejuízos elevados, é necessária a monitorização e identificação de zonas de risco de forma a providenciar proteção, prevenção e socorro adequados (ANPC, 2010).

Esta temática é igualmente assinalada como prioritária pelo POVT (Plano Operacional de Valorização do Território), como descrito no seu Eixo II – Sistemas Ambientais e de Prevenção, Gestão e Monitorização de Riscos, Domínio de Intervenção da Proteção Costeira, onde são objetivos a melhor compreensão das ameaças e potencialidades decorrentes do funcionamento da zona costeira, de forma a melhor definir as zonas sujeitas a riscos de erosão e/ou de cheias, e a prevenção dos diversos riscos associados às zonas costeiras, numa perspetiva de garantir a sua sustentabilidade ecológica, ambiental e social.

As intervenções preconizadas por este plano passam por (POVT¹, 2015):

- Ações de investigação sobre estabilidade geológica dos terrenos costeiros e previsão da evolução de arribas ativas (...);
- Ações de classificação e de delimitação de zonas de risco, de zonas ameaçadas pelas águas do mar ou de instabilidade de arribas litorais, no sentido de conter a ocupação antrópica em áreas de risco;
- Ações que concorram para a constituição de sistemas de informação tendo em vista integrar e melhorar o conhecimento, otimizar o acesso à informação (global e local), estimular a investigação, a participação e a responsabilização e apoiar o planeamento, a gestão e a tomada de decisão em matéria de defesa costeira.

Neste contexto, a caracterização das arribas litorais e o estudo da sua evolução são de primordial importância para a gestão e planeamento da orla costeira, fazendo parte integrante dos planos de ordenamento oficiais e revestindo-se, portanto, de um interesse que vai para além da investigação teórica.

Apesar da indiscutível importância da interpretação geológica e amostragem no campo, existem limitações na recolha de dados, especialmente quando se pretende elevada precisão quantitativa na descrição dos fenómenos naturais em estudo. As técnicas de deteção remota podem superar algumas das dificuldades, em particular no que respeita a capacidade de adquirir uma grande quantidade de dados de alta resolução, incluindo em áreas inacessíveis, a uma distância segura de um afloramento, num período de tempo muito curto. A análise e interpretação dos resultados podem ser realizadas mais tarde em gabinete, sem restrições de tempo ou de acesso ao objeto (afloramento), produzindo resultados que ficam rapidamente disponíveis

¹ <http://www.povt.qren.pt/>

para posterior uso e comparação. A informação básica é salvaguardada e, se necessário, um cenário que já não existe pode ser reexaminado.

1.1 Enquadramento

Na origem dos trabalhos que se apresentam nesta dissertação está um projeto pioneiro a nível nacional, promovido pela Administração da Região Hidrográfica do Tejo, I.P., que foi posteriormente integrada na Agência Portuguesa do Ambiente (APA, I.P.), denominado “Criação e Implementação de um Sistema de Monitorização do Litoral” (CISML). O grande objetivo do projeto CISML foi desenvolver metodologias de trabalho para otimizar a monitorização do litoral, tendo como área geográfica piloto todo o litoral arenoso e de arriba entre a foz do rio Lis e o Cabo Espichel. Este projeto desenvolveu-se entre 2011 e 2013 e nele participaram conjuntamente a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

No que respeita o litoral de arriba, foi prevista a aplicação de técnicas de fotogrametria aérea para fins de monitorização e ainda a exploração dos dados para retirar conclusões sobre a evolução dos segmentos rochosos de arriba da área piloto à escala multi-temporal, incluindo a definição de uma linha de crista e de sopé das arribas, a construção de um inventário de movimentos de vertente, a execução de cartografia de suscetibilidade à ocorrência de movimentos e a definição de faixas de risco a aplicar em futuros planos de ordenamento territoriais (Andrade *et al.*, 2013; Marques *et al.*, 2013a, 2013b, 2013c, 2013d; Penacho *et al.*, 2013a, 2013b; Redweik *et al.*, 2013). O conjunto de relatórios técnicos e final que resultaram deste projeto encontram-se disponíveis *online* no sítio da APA, I.P. (<http://www.apambiente.pt/>).

Assim, foram definidos segmentos a estudar por fotogrametria aérea multitemporal (Figura 1), tendo por base os voos descritos na Tabela 1, e onde se pretendia estabelecer uma situação de referência relativa à posição da linha de crista e sopé para, posteriormente, se poder dar continuidade ao estudo da evolução das arribas por este método. A situação de referência foi estabelecida pela estereorrestituição da linha de crista e sopé das arribas destes segmentos, com base no voo fotogramétrico digital datado de 2010.

Tabela 1 - Características gerais das coberturas aéreas disponíveis para a área de abrangência do projeto CISML.

Voo	Entidade	Data	Escala	Nº. fotografias
SPLAL ² /SCE	CiGeoE (ex-IGeoE)	1943-1958	1:17000	175
RAF (Royal Air Force)	CiGeoE (ex-IGeoE)	1947	1:30000	97
USAF (United States Air Force)	CiGeoE (ex-IGeoE)	1958	1:30000	112
FAP Litoral (Força Aérea Portuguesa)	FAP	1980	1:15000	145
FAP Oblíquo (Força Aérea Portuguesa)	FAP	1984	N.A.	28
Município 2010	Município, E.M.,S.A.	2010	GSD 0.3m	413

As tecnologias de aplicação terrestre foram reservadas para locais considerados prioritários para as autoridades e que foram classificados como sendo de alto risco, e que necessitavam de uma monitorização de elevada resolução geométrica e temporal. Estes correspondem às arribas que limitam praias que são densamente ocupadas na época balnear, representando locais relevantes do ponto de vista económico, embora alberguem potencial perigo. Dez praias ao longo da costa Oeste portuguesa (Figura 2, Tabela 2), correspondendo a 15 sectores de arriba, foram monitorizadas por fotogrametria terrestre e/ou por varrimento

² Sociedade Portuguesa de Levantamentos Aéreos, Ltd.

com *laser scanner* terrestre em intervalos de tempo regulares. O contacto direto com as autoridades (ARH Tejo/APA, I.P.) permitiu ter conhecimento de movimentos de massa que ocorreram durante a execução do projeto, nos sectores em monitorização pelo que, para além dos levantamentos planeados, foram realizados levantamentos intermédios aquando destas situações.



Figura 1 – Identificação do litoral de arriba a estudar por fotogrametria aérea, com sinalização das zonas críticas, de acordo com a APA, I.P. (ARH Tejo) (fonte: Marques et al., 2013).



Figura 2 – Localização das praias prioritárias para levantamentos com técnicas terrestres.

Tabela 2 – Características gerais dos levantamentos por técnicas terrestres nas praias prioritárias.

LOCAL	PLANO DE APOIO		TÉCNICA	APOIO EXECUTADO	LEVANTAMENTO FOTOGRÁFICO e FOTOGRAMÉTRICO	N.º IMAGENS				LEVANTAMENTO LASER SCANNER	OBSERVAÇÕES
	Pontos Ref ^a .	Pontos Fotogram.				Época 0	Época 1	Época 2	Época 3		
Praia de S. Bernardino	2	33	TS ³ , GPS-RTK	✓	✓	91	108	269	-	-	
Praia do Forte de Paimogo	1	32	TS, GPS-RTK	✓	✓	121	-	-	-	-	Impossibilidade de obtenção correta de imagem ou laser
Praia de Porto das Barcas	1	13	TS, GPS-RTK	✓	✓	101	-	-	-	-	Monitorização inviabilizada por obras/intervenções
Praia de Porto Dinheiro	2	20	TS, GPS-RTK	✓	✓	66	-	-	-	-	Monitorização inviabilizada por obras/intervenções
Praia de Valmitão	3	37	TS, GPS-RTK	✓	✓	186	188	138	306	-	
Praia do Porto da Calada	2	32	TS, GPS-RTK, Laser scanner	✓	✓	72	259	466	-	✓ (17/07/2012) ✓ (28/06/2013)	Época 3 inviabilizada por obras/intervenções
Praia de S. Julião	2	41	TS, GPS-RTK	✓	✓	108	-	-	-	-	
Praia do Magoito	1	18 + 31	TS, GPS-RTK	✓	✓	82	Vídeo	-	-	-	
Praia da Adraga	1	14	TS, GPS-RTK	✓	✓	34	199	-	-	-	
Praia da Bafureira	4	11+28	TS, GPS-RTK, Laser scanner	✓	✓	41	193	126	156	✓ (27/03/2012) ✓ (07/04/2014)	
TOTAL	20	308	-	-	-	801	947	466	306	4	

³ Total Station (Estação Total)

1.2 Considerações iniciais

Tratando-se de um trabalho que tem como objeto de estudo as arribas litorais, considera-se importante esclarecer alguns conceitos que, embora não se enquadrem no âmbito desta dissertação como tópico a explorar, são necessários para uma leitura contextualizada.

O termo arriba define uma morfologia concreta (ver Trenhaile, 1987; Sunamura, 1992; Decreto-Lei n.º 166/2008 - Reserva Ecológica Nacional): uma vertente, normalmente rochosa, em ambiente litoral, que se apresenta com um declive forte, na generalidade não inferior a 30º, ou mesmo vertical. Do ponto de vista científico, uma arriba é uma vertente cujo principal elemento erosivo é a agitação marítima, que atua diretamente no sopé e face, tratando-se de uma “arriba ativa”. Dependendo do contexto em que esta morfologia é analisada, os seus elementos morfológicos caracterizadores – crista e sopé – são definidos e delimitados de formas distintas: do ponto de vista do estudo da evolução das arribas, a crista deverá ser delimitada na primeira quebra acentuada de declive, a partir do sopé; do ponto de vista do ordenamento do território, a crista é delimitada na quebra de relevo que separa uma face declivosa do terreno adjacente para terra.

O fenómeno erosivo que ocorre nas arribas é fundamentalmente representado por movimentos de massa, que podem ser de diferentes tipologias (ver Varnes, 1978; Trenhaile, 1987; Sunamura, 1992; Cruden e Varnes, 1996, p. ex.). O estudo da evolução das arribas é realizado com base nestas ocorrências através da compilação de inventários caracterizadores de cada movimento individual (tipologia, data da ocorrência, área, volume deslocado, fatores geológicos e geomorfológicos, entre outros) e da elaboração de diferentes tipos de cartografia (ver Guzzetti, 2005). A qualidade dos resultados de uma cartografia de suscetibilidade ou risco, dependem diretamente da qualidade destes inventários.

Entende-se também o termo *perigosidade* como a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente perigoso num dado local (componente espacial, suscetibilidade), num dado período de tempo (componente temporal) (Varnes, 1984) e com uma dada magnitude (Guzzetti *et al.*, 2005). Neste trabalho aborda-se a *suscetibilidade*, isto é, a determinação da probabilidade de ocorrer uma instabilidade numa dada arriba. Esta definição difere da do termo risco, que, embora não havendo definição consensual, se pode definir como a possibilidade de ocorrência de consequências gravosas, económicas ou mesmo para a segurança de pessoas e bens.

1.3 Contribuição do trabalho

O presente trabalho insere-se no contexto da problemática discutida, apresentando soluções práticas rigorosas e inovadoras, que contribuem para o avanço do conhecimento acerca dos fenómenos erosivos em arribas, através da aplicação de técnicas de teledeteção de elevada resolução, exploração de dados e modelação de resultados.

Pretende-se, com esta dissertação, analisar e demonstrar o potencial da aplicação de técnicas de obtenção de dados, com alta resolução e qualidade, na monitorização de ambientes de arriba ativa ou taludes inseridos no contexto da orla costeira de arriba rochosa; demonstrar a mais-valia e os desafios de explorar os dados no seu formato nativo, sem simplificações, e como tirar o maior proveito da tridimensionalidade como a melhor

aproximação à realidade; apresentar resultados de elevada qualidade e disponibilizá-los no seu formato original 3D, superando as limitações da simples análise e interpretação de imagens 2D.

O seu carácter inovador revela-se nos seguintes aspetos:

1. Aplicação de técnicas terrestres de aquisição de dados a grande escala das faces de arribas – fotogrametria terrestre e *laser scanner* terrestre – e monitorização da evolução;
2. Tratamento e exploração dos dados exclusivamente em ambiente 3D;
3. Deteção e quantificação automáticas de alterações morfológicas em fachadas de arribas;
4. Extração automática rigorosa de métricas caracterizadoras dos movimentos de vertente em arribas: volumes, áreas afetadas e dimensões;
5. Inventariação de movimentos em fachadas de arriba;
6. Determinação automática de fatores de predisposição à ocorrência de movimentos para aplicação de modelos estatísticos de suscetibilidade (declives, exposições e indicadores morfológicos da resistência dos materiais geológicos);

1.4 Estrutura do trabalho

A dissertação encontra-se estruturada de forma a dar resposta aos objetivos já descritos e salientando a inovação que se considera ter atingido com este trabalho. Assim, o documento desenvolve-se de acordo com os seguintes tópicos:

- **Estado da Arte;**
- **Técnicas utilizadas na monitorização de arribas**, onde são descritos de forma breve os métodos que podem ser aplicados na monitorização de arribas e quais os produtos que delas podem ser derivados, bem como uma avaliação geral da sua performance neste contexto;
- **Metodologias e algoritmos desenvolvidos**, onde são apresentados detalhadamente não só as metodologias aplicadas, mas também o trabalho de desenvolvimento de metodologias realizado com vista à automatização de processos, designadamente o programa VOLTERRE desenvolvido para o cálculo de dimensões, áreas e volumes de movimentos de terra detetados em nuvens de pontos;
- **Exploração das técnicas para a monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas**, onde são apresentadas diferentes aplicações das técnicas terrestres e resultados obtidos em distintos casos de estudo;
- **Estudo da suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas**, onde se apresenta o estudo de recuperação de levantamentos terrestres analógicos, não fotogramétricos, e a aplicação de um modelo estatístico de regressão logística para determinação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente e correspondente cartografia;
- E por fim, apresentam-se as **Considerações finais** onde se resumem as conclusões retiradas deste trabalho e se indicam algumas possibilidades de trabalho futuro.

Em **Referências**, são apresentadas as referências bibliográficas citadas no texto, por Capítulo, de forma a facilitar a consulta contextualizada.

Em **Anexo**, consta a informação referente à aplicação web desenvolvida para disponibilização de dados 3D *online*, permitindo tirar maior proveito dos dados devido ao ambiente tridimensional que facilita a interpretação e interação com os resultados: <http://arcg.is/1QYKzIG>.

2. Estado da Arte

Desde sempre que as zonas costeiras têm sido um local preferencial de fixação da população e, conseqüentemente, de serviços e indústria pelo que têm sido alvo de estudos e monitorização a diferentes escalas. Dado o seu potencial produtivo, as zonas costeiras são economicamente atrativas e ambientalmente sensíveis, gerando intensos conflitos de interesses e profundos impactes ambientais que colocam em risco o ecossistema e os atuais usos e ocupações, independentemente das evoluções ou convulsões que se perspetivam (ANPC, 2010).

A nível mundial, a zona costeira tem sido explorada por vários institutos e laboratórios de investigação, com especial incidência nos setores arenosos. Nestes segmentos, o principal indicador de evolução é o recuo da linha de costa, associado a alterações no balanço sedimentar das praias, e com conseqüências muito visíveis para a sociedade. O comportamento do fenómeno erosivo é já bem conhecido e as técnicas de deteção remota, especialmente com os grandes desenvolvimentos dos últimos anos a nível de sensores e plataformas de aquisição de dados, vieram facilitar e melhorar a deteção e contabilização desse recuo e perda de sedimentos.

O litoral rochoso tem sido sistematicamente remetido para segundo plano, não pelas conseqüências do principal fenómeno que constitui a base da sua evolução – os movimentos de massa -, que muitas vezes se revela fatal ou quase fatal, mas porque o comportamento desse fenómeno é de difícil compreensão e está associado a um largo conjunto de variáveis que são também de complexo entendimento. É de salientar, no entanto, o trabalho de Trenhaile (1987) em que são descritos em detalhe os processos que atuam nos litorais rochosos e, ainda, a contribuição fundamental de Sunamura (1992) sobre a geomorfologia de litorais rochosos, onde é aprofundada a temática dos movimentos de massa em arribas rochosas, e onde se encontra compilado o maior conjunto de informação sobre taxas de recuo a nível mundial publicado até à data.

Marques (1997) apresenta uma listagem resumida das ordens de grandeza das taxas de recuo de arribas, por litologia, baseada nos dados de Sunamura (1992), dados que podem ser utilizados para comparação das taxas de recuo calculadas:

- Rochas graníticas: 10^{-3} m/ano;
- Calcários: 10^{-3} a 10^{-2} m/ano;
- Flish, xistos argilosos, argilitos: 10^{-2} m/ano;
- Arenitos e rochas sedimentares terciárias: 10^{-1} a 10^0 m/ano;
- Depósitos quaternários: 10^0 a 10^1 m/ano;
- Projeções vulcânicas não consolidadas: 10^1 m/ano.

É de salientar um artigo de referência, Chandler (1999), sobre a aplicação de fotogrametria digital – aérea, oblíqua e com considerações sobre fotogrametria terrestre – para estudos de âmbito geomorfológico, onde é

feita ainda referência a artigos que datam de 1995 como sendo relevantes para o avanço da utilização de técnicas de deteção remota, incluindo LiDAR. Até há cerca de uma década, a literatura assentava quase exclusivamente na aplicação de técnicas de aquisição de dados a partir de satélites ou fotografia aérea para contabilizar e interpretar as alterações ocorridas em litorais rochosos, de que são exemplo os trabalhos pioneiros de Horikawa e Sunamura (1967) e Sunamura e Horikawa (1969) e posteriormente de Lim *et al.* (2005), Zviely *et al.* (2004), Hapke *et al.* (2004), Mills (2005), Miller *et al.* (2008), entre outros.

Para além da geometria de obtenção vertical do LiDAR e da fotografia aérea vertical, o potencial das fotografias oblíquas é salientado na investigação e caracterização de regiões afetadas por movimentos (Matthews *et al.*, 1986), sublinhando a necessidade de cuidado na interpretação fotográfica destes materiais e a dependência da experiência do intérprete (Fookes *et al.*, 1991; Hart *et al.*, 2009). Walstra *et al.* (2007) salienta o potencial que um arquivo fotográfico oferece no estudo da evolução de movimentos de vertente, uma vez que a cobertura temporal sequencial captura todas as alterações morfológicas à superfície da Terra.

Em Portugal, os primeiros trabalhos sobre evolução de arribas litorais incidiram sobre o litoral Sul algarvio com Marques (1991) a publicar o primeiro trabalho onde se apresenta a evolução do litoral de Quarteira, com estimativas de velocidades de evolução realizadas com base em métodos simplificados aplicados em fotografias aéreas de diferentes datas, publicados posteriormente em Marques (2006). Apenas cerca de uma década depois, estes resultados, foram comparados com estudos baseados em fotogrametria aérea à escala local em arribas de evolução rápida (Catalão *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2003, 2008) passando à escala regional, primeiro com trabalhos publicados para a totalidade do litoral algarvio (Marques, 1997a, 1997b), em arribas com taxas de recuo baixas (Redweik *et al.*, 2008, 2009; Matildes *et al.*, 2008, 2012, 2013a; Marques *et al.*, 2011, 2013), usufruindo do rico acervo de fotografias aéreas, com coberturas mais ou menos completas do litoral, que datam desde a década de 30 do séc. XX (Redweik *et al.*, 2010). Marques (1998) apresenta uma compilação dos trabalhos realizados em arribas no litoral português, até aquela data.

A utilização de levantamentos por LiDAR aéreo trouxe à literatura vários trabalhos em que se apresenta a comparação entre este método e a fotogrametria aérea, no que respeita a aplicabilidade, eficiência, custo-benefício e precisão alcançada de ambos os métodos, de que é referência o artigo de Baltsavias (1999). Jaboyedoff *et al.* (2010) e Young *et al.* (2010) apresentam uma revisão das características do LiDAR aéreo e *laser scanner* terrestre na produção de modelos digitais de terreno de alta resolução, particularizando para o caso do estudo de movimentos de massa, com aplicações desde a fase de deteção à modelação.

Tendo em conta a grande maturidade da fotogrametria como técnica de aquisição de dados sobre o terreno, a primeira técnica terrestre de aquisição de dados a ser aplicada foi a fotogrametria terrestre. O desenvolvimento de novas câmaras terrestres e o aparecimento do sensor digital em câmaras comerciais de boa qualidade permitiu que se iniciasse a exploração mais intensiva da técnica para estudos de alteração do terreno. O varrimento *laser* terrestre veio também auxiliar na abertura de novas frentes de trabalho.

Poulton *et al.* (2006) realizou um primeiro trabalho sobre o tema da monitorização do litoral com *laser scanner* apresentando também uma comparação entre a aplicação desta técnica e a fotogrametria terrestre, concluindo que a primeira se revela mais vantajosa para o objetivo. Mas são vários os trabalhos publicados sobre a aplicação de *laser scanning* para estudos de alterações no litoral (Gulyaev e Buckeridge, 2004; Rosser, 2005; Lim *et al.*, 2006, 2010; Collins e Stock, 2012; Hoffmeister *et al.*, 2012; Dewez *et al.*, 2009, 2013; Abellan *et al.*, 2010; Katz e Mushkin, 2013; Salvini *et al.*, 2011. entre outros).

Beraldin (2004) refere que, como acontece com as “novidades” tecnológicas, alguns autores chegaram a prever uma lenta mas inevitável substituição da fotogrametria terrestre pela utilização do *laser scanner*, mas

rapidamente a comunidade científica se apercebeu que a fusão dos dados provenientes do *laser scanner* e da fotogrametria terrestre potenciava qualquer análise a realizar, em vários ramos de aplicação (Barber *et al.*, 2001; Bitelli *et al.*, 2004; Koleka, 2004; Demir *et al.*, 2004; Jansa *et al.*, 2004).

Mais recentemente, têm sido comuns os estudos em que é realizada, à escala local, a aplicação conjunta de fotogrametria terrestre e levantamentos com *laser scanner* com o objetivo de estudar o fenómeno da instabilidade de maciços rochosos: Sturzenegger e Stead (2009), Salvini *et al.* (2013), McQuillan (2013), entre outros.

Ao percorrer a literatura que apresenta comparações entre o *laser scanner* e a fotogrametria terrestre, a principal vantagem da utilização do *laser scanner* é a rapidez com que se obtêm dados, a imediata disponibilização de pontos 3D do objeto de interesse e a densidade desses dados (nuvens de pontos). Especialmente nos últimos anos, o desenvolvimento de algoritmos de correlação de imagem (IBM – *image-based modelling*) tem vindo a diminuir significativamente o tempo de reconstrução tridimensional de um objeto mantendo a precisão e qualidade necessárias, e, portanto, a superioridade do *laser scanner* relativamente à fotogrametria está a ser lentamente desmistificada (Skarlatos e Kiparissi, 2012), especialmente quando é crucial a existência de imagens de alta resolução para interpretação dos resultados. Estas questões são exploradas com detalhe no trabalho de Sima *et al.* (2010) e Buckley *et al.* (2006, 2008). Leberl *et al.* (2010) chega mesmo a referir que o processo fotogramétrico se baseia atualmente em quatro “novidades”: imagens digitais, melhor qualidade radiométrica, correlação *multi-view* e a possibilidade de tirar partido das GPUs (Graphic Processing Units) para melhor e mais rápida correlação de imagens e que, assim, as nuvens de pontos resultantes, que apresentam precisão sub-pixel, resolução tão ou mais densa que as provenientes de *laser scanner* e quase em tempo real, reduzem fortemente a necessidade de se passar para o *laser scanner*.

Este aumento na rapidez de obtenção de resultados de elevada resolução e qualidade, que recoloca a fotogrametria terrestre como uma referência no panorama científico, e remetendo mesmo o *laser scanner* a um plano inferior (ex. Dewez, 2014), advém dos algoritmos de IBM que foram desenvolvidos nos últimos anos.

Vários programas, proprietários e livres, e aplicações baseadas na web utilizam o *scale invariant feature transform* (ou SIFT) (Lowe, 1999), e algoritmos de construção de nuvem de pontos densas como PMVS / CMVS (*Patch-based Multi-view Stereo / Clustering Views for Multi-view Stereo*) com o objetivo de produzir modelos de nuvem de pontos 3D a partir de conjuntos de imagens de um objeto.

Um dos programas mais aplicados e referidos na literatura devido ao seu carácter mais amigável (Snavely *et al.*, 2007) é o VisualSfM (Falkingham, 2013; Wu, 2013; Wu *et al.*, 2011), que aplica algoritmos de *Structure From Motion* (SfM) para um conjunto de imagens não sequenciais e gera densas nuvens de pontos como modelo 3D do cenário representado. Fonstad *et al.* (2013) refere que, quando comparado com o processo fotogramétrico digital habitual, estes algoritmos providenciam um nível de automatização e facilidade de utilização bastante superior.

Estes algoritmos foram já aplicados com sucesso em estudos de terreno (Westoby *et al.*, 2012; Fonstad *et al.*, 2013), e em particular a arribas litorais como descrevem Dewez (2014), Ružić *et al.* (2014) e Obanawa (2015).

Havendo então algum consenso sobre a utilização conjunta da fotogrametria e *laser scanner* terrestres como forma de explorar ao máximo os objetos de estudo, e tirando proveito do desenvolvimento a nível de algoritmos que geram nuvens de pontos, começaram a ser desenvolvidos algoritmos direcionados para a comparação direta entre nuvens de pontos ou entre nuvens de pontos e superfícies (Girardeau-Montaut *et*

al., 2005; Lague *et al.*, 2013) suprimindo a necessidade de transformar as nuvens de pontos em superfícies, o que traz vantagens quando se pretende modelar objetos muito irregulares como a face de uma arribas. Estes trabalhos, e outros algoritmos desenvolvidos para a edição de nuvens de pontos e para diferentes objetivos, foram compilados no programa livre CloudCompare (2015), que se iniciou exatamente com o trabalho de Girardeau-Montaut *et al.* (2005), e que foi apresentado em 2006 sob forma de tese doutoral de âmbito industrial (Girardeau-Montaut, 2006).

A recolha de dados de elevada resolução e em grandes quantidades, como os levantamentos por *laser scanner*, por exemplo, são um avanço importante para o conhecimento do fenómeno dos movimentos de vertente (Marques *et al.*, 2013) e na determinação da suscetibilidade. A qualidade, a completude e a resolução dos inventários de movimentos são fundamentais para a correta determinação da suscetibilidade, perigosidade e risco (Guzzetti, 2005). No que concerne a determinação destes parâmetros, ela pode ser baseada em métodos qualitativos ou quantitativos, sendo o método utilizado neste trabalho um método quantitativo de base estatística – regressão logística. Este método foi já aplicado com sucesso em diferentes trabalhos, com base em inventários de movimentos executados a partir de imagens aéreas e confirmação no terreno, de que são exemplo Guzzetti (2005), que cita ainda outros trabalhos focados em movimentos de vertente em terra, e, em território português, Marques (2013), bem como Marques *et al.* (2013) em arribas litorais de recuo lento. No extenso conjunto de literatura analisado, a aplicação destes métodos de determinação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos em faces de arribas ainda não foi testada.

A importância de um inventário de movimentos rigoroso, que constitua a base fundamental para a geração de cartografia de risco de movimentos, é salientada em diversos trabalhos. Embora referente a movimentos em terra, Guzzetti (2005) apresenta as técnicas, métodos e ferramentas aplicadas a movimentos de massa, fazendo recomendações sobre “boas práticas” no tratamento do problema e, principalmente, sobre o que deverá ser considerado na deteção e na cartografia de base de movimentos de massa. Dadas as especificidades e complexidades do tema, deve ser dada especial atenção a inventários onde sejam registados diferentes tipos de movimentos passíveis de serem compilados num mapa, bem como informação associada (Chácon *et al.*, 2006). Segundo Marques *et al.* (2013), a ausência destas boas práticas e métodos regulamentados para as zonas costeiras de arribas promove o potencial conflito entre as autoridades responsáveis pelo planeamento do território e os proprietários de terrenos ou promotores imobiliários.

Guzzetti *et al.* (2005) refere que o valor de um mapa depende diretamente do seu conteúdo informativo, que, por sua vez, depende do tipo de dados, da sua qualidade, e de que forma essa informação é nova e essencial.

Da análise da literatura existente, verifica-se que a aquisição de informação de base rigorosa e completa sobre os processos de evolução das arribas é um passo fundamental para apoiar os estudos subsequentes sobre a suscetibilidade, perigosidade e risco.

3. Técnicas utilizadas na monitorização de arribas

3.1 Fotointerpretação

A fotointerpretação é um método simples de observação fotográfica, com aplicações em várias áreas, que tem os seus fundamentos apresentados detalhadamente nas obras de referência da The American Society of Photogrammetry: *Manual of Photogrammetry* (McCurdy, 1994), *Manual of Remote Sensing* (1975) e ainda Kiser e Paine (2012). É uma técnica muito usada em estudos qualitativos de evolução da paisagem e deteção de alterações. Apesar de apenas fornecer informação que carece de rigor geométrico, é uma técnica que, estando disponíveis as imagens a observar, permite rapidamente identificar diferentes fenómenos e, então, se desejado, passar a uma fase que permita a quantificação do fenómeno observado (Lu *et al.*, 2004).

Para um sistema de monitorização do litoral, esta técnica permite comparação temporal mono e estereoscópica de cristas de arribas e deteção de alterações ocorridas com base em fotografias aéreas de diferentes datas e de alterações no declive da face destas morfologias, nos casos em que a fotografia aérea permita alguma visibilidade das fachadas. A observação de fotografias aéreas oblíquas é muito útil para a caracterização geológica e deteção de movimentos de vertente à escala regional já que são normalmente capturadas em voos baixos realizados junto à costa com esse propósito e cobrindo longos sectores do litoral. As fotografias terrestres permitem uma caracterização geológica muito detalhada da face das arribas e a interpretação dos mecanismos de rotura associados a movimentos de massa.

O investimento necessário para a aplicação deste método é relativamente baixo, sendo que o maior peso pode ser atribuído ao custo de aquisição das fotografias aéreas, propriedade de empresas privadas, da Direção Geral do Território ou do Centro de Informação Geoespacial do Exército (ex-Instituto Geográfico do Exército). No caso da utilização de fotografias provenientes de levantamentos fotográficos terrestres, o investimento necessário é o associado à aquisição de uma câmara padrão de qualidade adequada aos objetivos.

A fotointerpretação simples, mesmo adicionando a perceção tridimensional do terreno através do estereoscópio ou da geração de anaglifos, permite obter estimativas de distâncias e de áreas, não permitindo porém medições precisas de área e volumes deslocados. No entanto, é uma técnica acessível, que não requer *software* específico ou formação avançada para ser aplicada ainda que a qualidade dos resultados dependa fortemente da experiência do fotointérprete e, no caso em que se pretende verificar alterações ao longo do tempo, com diferentes coberturas aéreas, das características das imagens a analisar (Congalton e Mead, 1983).

Em Portugal, uma evolução importante no que respeita o alcance dos resultados da fotointerpretação foi apresentada por Marques (2006), onde é descrita a utilização de métodos simplificados de observação de

fotografias aéreas para obter estimativas de áreas perdidas e volumes deslocados com recurso a um estereoscópio de mesa, com lentes de ampliação de 8x. A utilização deste tipo de técnicas produziu os primeiros resultados quantitativos sobre a evolução de arribas em Portugal, que abrangeram extensos setores costeiros com arribas (Marques, 1991, 1994, 1997a, b, 1998; Sobreira e Marques, 1994).

A fotointerpretação de fotografias terrestres ou oblíquas, não só auxilia a caracterização dos movimentos nos inventários referidos, como permite a execução de *layouts* temáticos horizontais e verticais 2D aproximados (Figura 3). Pode ainda constituir um apoio na deteção de zonas onde se poderá eventualmente definir uma campanha de levantamento com técnicas de fotogrametria terrestre ou *laser scanning* para quantificação de um evento (Figura 4).

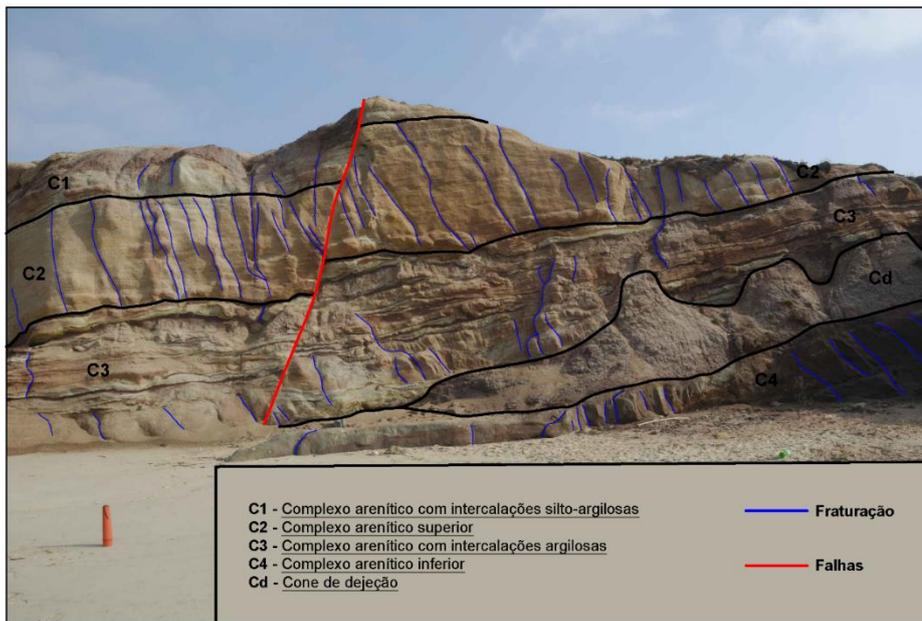


Figura 3 – Desenho esquemático de elementos geológicos e geomorfológicos por fotointerpretação.



Figura 4 – Deteção de movimento de grandes dimensões por comparação visual de fotografias aéreas oblíquas (fonte: portal SIARL).

3.2 Fotogrametria Aérea

Para além da fotointerpretação simples, esta técnica permite a estereorrestituição 3D detalhada de elementos das arribas, como crista e base, e ainda outras características de interesse, assim como a geração automática de modelos digitais de terreno. A aplicação multitemporal de fotogrametria aérea fornece informação fundamental sobre o recuo sofrido pela crista por comparação geométrica de linhas e determinação de áreas perdidas e volumes deslocados (Marques *et al.*, 2011). Esta comparação requer uma referenciação espacial comum, que é conseguida através de triangulação fotogramétrica com base em pontos fotogramétricos e pontos comuns entre as imagens de diversas épocas.

A fotogrametria aérea digital permite caracterizar e datar com elevada precisão métrica alterações em arribas. Em Portugal, é possível, para a maioria das regiões, recuar no tempo até mais de seis décadas com recurso a um valioso repositório de fotografias aéreas analógicas e digitais (Redweik *et al.*, 2010) embora os voos mais antigos apresentem desafios especiais relacionados com a sua idade, o seu estado de conservação e falta de informações sobre a câmara utilizada.

No entanto, a geometria de aquisição vertical coloca restrições à avaliação de alterações na face das arribas, exigindo esta componente da avaliação abordagens adicionais não verticais. O investimento inicial pode ser relevante quando se tem em consideração o *software* fotogramétrico necessário e a necessidade de formação avançada dos operadores, além dos custos de aquisição de fotos.

Em termos de custo-eficácia, esta técnica destaca-se pela qualidade, fiabilidade e diversidade de *outputs*.

Os produtos de um projeto fotogramétrico podem ser de naturezas muito diferentes, desde o formato básico da correlação automática de imagem – uma nuvem de pontos representativa dos objetos que constam nas imagens como os modelos digitais de terreno ou de superfície e, a partir destes, ortoimagens, - e desenho gráfico 2D ou 3D, por restituição ou estereorrestituição fotogramétrica, de qualquer elemento de interesse representado nas imagens processadas.

3.2.1 Comparação Fotointerpretação vs. Fotogrametria aérea para inventariação multi-temporal de movimentos de vertente

A cartografia de movimentos de vertente é um tema em constante investigação, devido não só ao desenvolvimento de novas técnicas de aquisição e processamento de dados, mas também à evolução da capacidade dos *software* e *hardware* para representarem essa cartografia.

Existem diferentes tipos de cartografia de movimentos de vertente: mapas inventário, de susceptibilidade, de perigosidade, de risco (Chácon *et al.*, 2006). Um aspeto fundamental e transversal a toda a cartografia referida é a necessidade de avaliar a qualidade geométrica e a completude da informação. Apesar da classificação em 4 tipologias, os mapas inventário, que reúnem o registo de todos os movimentos de vertente detetados numa determinada área geográfica durante um intervalo temporal, compõem o conjunto de dados de base para a posterior análise de suscetibilidade, perigosidade e risco, pelo que a sua qualidade afeta diretamente a qualidade das estimativas e, conseqüentemente, a sua representação cartográfica. Segundo Guzzetti (2005)

não estão ainda definidos critérios específicos para uma avaliação consistente da qualidade dos mapas inventário.

Os mapas inventário têm sido realizados com recurso à observação sistemática ou processamento fotogramétrico de fotografia aérea, analógica e digital, para cartografia à escala regional. A esta escala, a grande maioria da literatura de âmbito geológico utiliza a fotointerpretação como método de registo geomorfológico.

Foi realizado um exercício de comparação entre a aplicação da fotointerpretação com métodos simplificados (Marques, 2006) e de fotogrametria aérea com estereorrestituição, de forma a avaliar, num setor litoral nos concelhos de Torres Vedras e Mafra, as diferenças nos resultados obtidos por uma e outra técnica.

3.2.1.1 Cobertura da área de estudo por fotografia aérea

Para a costa de Portugal, e em particular para o setor litoral em questão, existem diversas coberturas fotográficas aéreas que permitem recuar no tempo até cerca de 70 anos, sendo a primeira cobertura datada das décadas de 30-40 do séc. XX. As coberturas fotográficas analógicas, que constituem a grande maioria das coberturas utilizadas neste estudo, podem ser alvo de processamento fotogramétrico digital por passagem da informação do filme para formato digital com recurso a *scanners* fotogramétricos de alta qualidade geométrica e radiométrica. Esta passagem a formato digital facilita ao mesmo tempo o processo de fotointerpretação recorrendo a dispositivos que possibilitam a visualização estereoscópica. Estes consistem num monitor associado a um estereoscópio de mesa, onde num *software* de processamento de imagem se visualizam as imagens de um par estereoscópico (Figura 5), e se usam ferramentas de *pan* e *zoom* sincronizadas, tornando o processo independente da utilização de objetivas ampliadoras no estereoscópio.

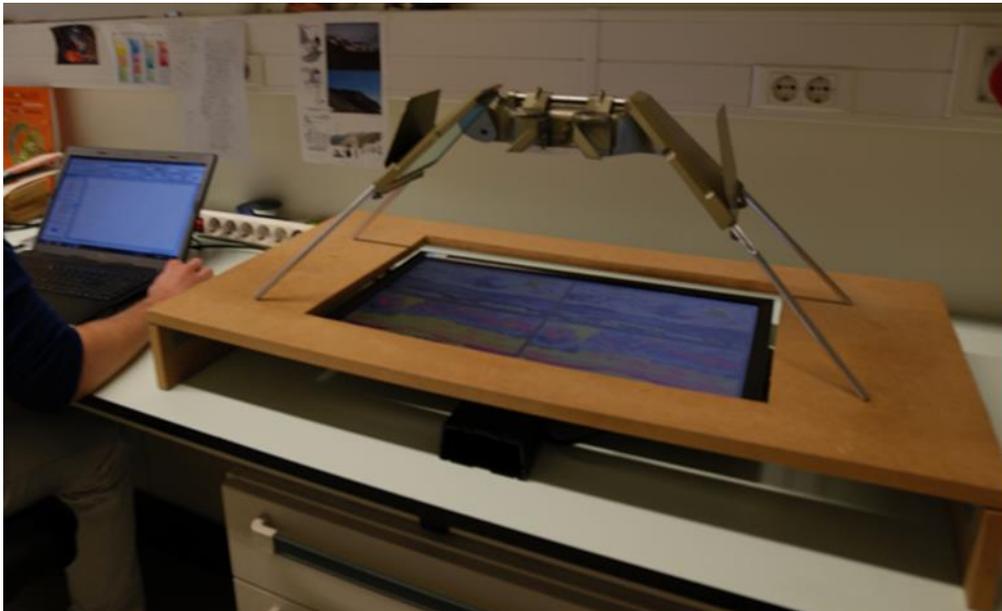


Figura 5 – Estereoscópio de mesa montado sobre um monitor onde está visível um par estereoscópico digital.

Apesar da quantidade de coberturas fotográficas aéreas existentes, estas nem sempre estão completas do ponto de vista geográfico, especialmente as mais antigas, apresentando lacunas de imagem em alguns setores de interesse da costa. Também estas coberturas mais antigas apresentam desafios muito particulares que podem tornar-se impeditivos do processamento fotogramétrico, como falta de informação sobre a câmara que obteve as imagens, deformações do suporte físico das imagens, deterioração, ou mesmo inexistência da imagem de marcas fiduciais, qualidade radiométrica e geométrica fraca por motivos relacionados com o objetivo final para o qual a cobertura foi realizada, incertezas na data de realização da cobertura, etc.

Para o litoral em estudo, cuja abrangência geográfica se apresenta na Figura 6 e que corresponde a cerca de 20 km de crista de arriba, estavam disponíveis as coberturas aéreas que se apresentaram na Tabela 1 (página 2).

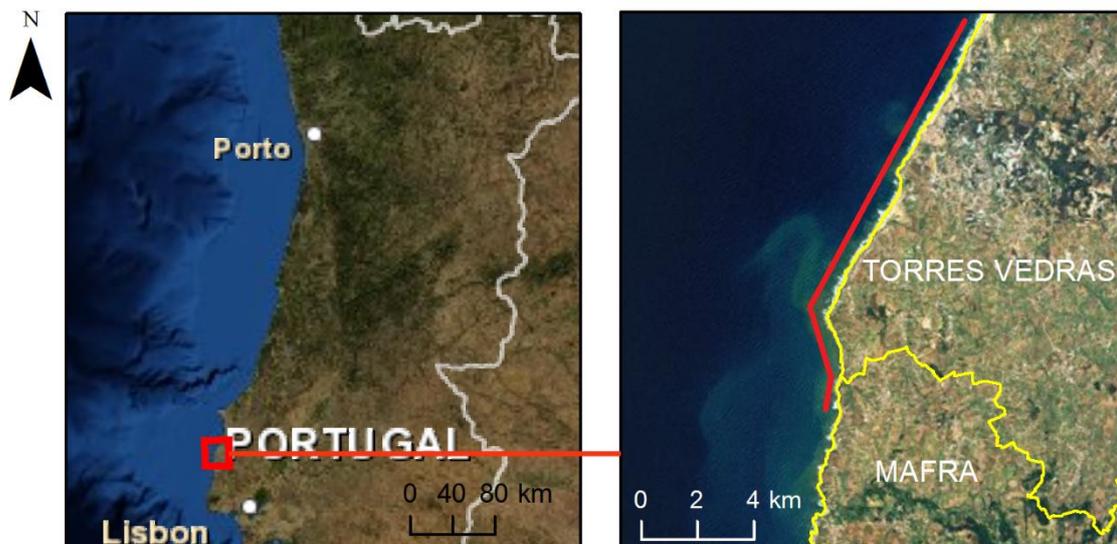


Figura 6 – Enquadramento geográfico da região em estudo.

3.2.1.2 Aplicação de fotogrametria aérea na determinação de movimentos de vertente

No âmbito do projeto CISML, foi realizado o processamento fotogramétrico da cobertura aérea digital realizada em 2010, pela Município, E.M, S.A., com um GSD de 30cm. Esta cobertura aérea foi realizada já com o suporte de GNSS/IMU, pelo que a georreferenciação das imagens foi feita pelo modo direto. No entanto, para aferir a qualidade posicional dos dados provenientes deste sistema, foi feita a avaliação dos parâmetros de orientação externa de um bloco de imagens da região de Cascais, através de comparação de coordenadas feita com base em pontos coordenados no terreno. Este teste revelou diferenças planimétricas na ordem dos 0.2 e 0.3m e altimétricas não superiores a 0.5m, pelo que se considerou válido aceitar os parâmetros de orientação tendo em conta o objetivo final. Foi então definida uma situação de referência da posição da linha de crista e linha de base das arribas por estereorrestituição para os setores de interesse.

Para a compilação de um inventário multi temporal de movimentos de vertente é necessário comparar a situação de referência, que neste caso se baseia na cobertura mais recente, com dados obtidos também por estereorrestituição, de coberturas mais antigas, por forma a avaliar a evolução das cristas das arribas.

Definiu-se, como cobertura de referência mais antiga, a primeira cobertura fotográfica de todo o território nacional, comumente designada por SPLAL/SCE. Infelizmente, esta cobertura está incompleta, havendo

setores do litoral oeste que não se encontram cobertos, e existem desafios adicionais ao seu processamento por fotogrametria (Redweik *et al.*, 2010; Marques, 2009). No entanto a sua escala favorável de 1:17000 e a excelente qualidade radiométrica das imagens originais, tornariam esta cobertura a melhor candidata à referência para fecho de janela temporal do inventário. Adicionalmente, as lacunas de informação referentes à câmara e dificuldades relacionadas com a operação de orientação interna destas imagens, que eram obstáculo ao seu ao processamento fotogramétrico, levaram à realização de trabalhos de investigação exaustivos (Redweik *et al.*, 2010; Marques, 2009) que tornaram então possível tirar proveito destas qualidades.

No entanto, as lacunas de cobertura fotográfica em alguns setores do litoral inviabilizam a sua utilização como referência exclusiva para a realização de um inventário multitemporal de movimentos de vertente por fotogrametria aérea para toda a área de estudo. Nos locais onde foi possível ser trabalhada esta cobertura aérea, executou-se a estereorrestituição dos elementos de interesse: crista da arriba e sopé da arriba.

Relativamente às coberturas analógicas mais antigas, por não disporem de parâmetros de orientação externa associados *a priori*, a georreferenciação é realizada de modo indireto por aerotriangulação baseada em pontos fotogramétricos.

Um dos locais a monitorizar por fotogrametria aérea onde a cobertura antiga permitia o processamento foi um setor litoral dos concelhos de Torres Vedras e Mafra, de acordo com o enquadramento da Figura 6.

O processamento fotogramétrico para esta região foi efetuado com base em pontos identificados nos pares estereoscópicos do voo de 2010, de onde se retiraram as suas coordenadas 3D. Ao todo, para a orientação de 11 imagens, dada a fraca geometria do bloco e a dificuldade em garantir a correspondência inequívoca de um ponto em 2010 e nas imagens SPLAL/SCE, foram registados 20 pontos.

A precisão final do ajustamento baseada no erro médio quadrático obtido nos pontos fotogramétricos (0.25 m tridimensional) é aceitável tendo em conta as características da cobertura aérea em questão e o objetivo do estudo. Considerando esta incerteza, e numa ótica conservadora, tendo em atenção que a georreferenciação das fotografias de 2010 também tem uma incerteza associada e considerando ainda a incerteza associada à restituição estereoscópica de elementos, não foram consideradas significantes, para efeito de inventário, as diferenças planimétricas inferiores a 1 m entre as duas coberturas aéreas, isto é, apenas alterações superiores a 1 m de largura na crista da arriba foram registadas como causadas por movimentos de vertente.

A segunda cobertura mais antiga disponível, realizada pela RAF em 1947, apesar de completa para todo o setor, apresenta sérias dificuldades no processamento dadas as suas características geométricas e radiométricas desfavoráveis. A escala aproximada de 1: 33000, a fraca qualidade radiométrica e geométrica, e a enorme variabilidade de câmaras usadas na obtenção das imagens (García e Linares, 1997), fazem desta cobertura um mau candidato ao processamento fotogramétrico: determinados blocos permitem algum ajustamento mas a sua qualidade posicional final inviabiliza a sua utilização para recolha e tratamento de informação para o objetivo do estudo.

Assim, utilizando apenas as coberturas SPLAL/SCE e Municipia (2010), foram restituídas a crista e base da arriba, sendo que no voo mais recente o processo foi efetuado ao longo de toda a faixa costeira em estudo e, no voo mais antigo, apenas se restituíram as zonas detetadas estereoscopicamente como tendo sofrido

alterações na morfologia. A estereorrestituição teve como objetivo a identificação das áreas perdidas no topo das arribas ao longo do intervalo temporal referido (Rosa, 2013).

3.2.1.3 Aplicação de fotointerpretação na determinação de movimentos de vertente

A interpretação do terreno por fotografia aérea tem sido uma técnica aplicada em vários ramos das ciências da terra, comprovando ser um método eficaz na deteção e reconhecimento de movimentos de massa de vertente pela disponibilidade de séries temporais variadas, facilidade na visualização tridimensional e interpretação, não exigindo, por isso, ferramentas específicas para o estudo, mas carecendo naturalmente de treino do observador.

A adequação da fotointerpretação a um estudo é função da escala e da qualidade geométrica e radiométrica das imagens, possibilitando o estudo da evolução das arribas qualitativa e quantitativamente, definindo áreas afetadas e taxas de recuo médio. No entanto, a correta interpretação das fotografias aéreas depende em grande parte da experiência do técnico, da metodologia e dos critérios usados e carece da consequente confirmação no terreno (van Zuidam, 1985; Marques, 1997; Antonini *et al.*, 2002, Guzzetti, 2005). Fatores naturais inerentes, como as diferentes condições meteorológicas e horas do dia em que foram obtidas as fotografias aéreas (variações de zonas de sombra, zonas de demasiada exposição solar), não contribuem conjuntamente para a melhor interpretação do terreno. As grandes vantagens desta técnica incluem, entre outras, a possibilidade de fazer uma avaliação geomorfológica numa área alargada, delimitar áreas instabilizadas e distinguir diferentes unidades geológicas. A comparação multi-temporal permite efetuar uma avaliação do desenvolvimento de determinado movimento, registando datas e individualizando movimentos que ocorram frequentemente no mesmo local (Gouveia, 2013).

No litoral de Torres Vedras-Mafra, as linhas de crista e de base foram digitalizadas em ambiente SIG com apoio de ortofotomapas e fotografias aéreas oblíquas, e por interpretação da topografia à escala 1:2000, datada de 2001 e com equidistância natural de 2 m, pertencente ao Instituto da Água I.P. (INAG), de onde se derivou um mapa de declives. Foram consideradas como arriba as zonas que apresentavam um declive superior a 30° e altura superior a 6 m (Figura 7) de acordo com a base topográfica referida. A delimitação interativa da crista baseou-se no contorno das curvas de nível na fronteira superior da zona onde o declive era superior a 30°. As áreas onde estavam presentes estruturas antrópicas foram excluídas dos troços de arribas considerados neste estudo. Para a marcação do sopé, em zonas onde existia aglomeração de detritos de pequena dimensão, recuou-se a linha de sopé para o interior, uma vez que estes detritos tendem a ser mobilizados pela ação da ondulação.



Figura 7 - Linhas de Crista e Sopé delineadas em ambiente GIS (A) e exemplo da sua identificação no terreno (norte da Praia Azul) (B).

A metodologia aplicada para a elaboração de um inventário multi-temporal de instabilidades foi baseada na consulta de fotografias oblíquas e visualização estereoscópica de fotografias aéreas verticais. Foram usados conjuntos de fotografias aéreas das coberturas RAF 1947, USAF 1958, FAP 1980 e Município de 2010 (Tabela 1, página 2).

Aquando da identificação de um movimento entre datas, procedeu-se à vetorização planimétrica (2D) da área afetada, no programa ArcMap 10 (Esri), sobre a informação topográfica já referida. A identificação dos movimentos e a cartografia da área perdida, ao nível da crista das arribas, depende assim da escala e qualidade das fotografias aéreas e do detalhe da base topográfica utilizada. São de apontar dificuldades na marcação de recuos entre as fotos aéreas verticais mais antigas (RAF 1947, USAF 1958 e FAP 1980) - o contraste é, por vezes, muito elevado, afetando negativamente o pormenor da fotointerpretação - e nas mais recentes (Município 2010) o forte incremento das áreas construídas, dificulta a realização da fotointerpretação comparada (Figura 8). Em troços de arribas que sofreram intervenções antrópicas e que alteraram a morfologia da crista, recuando-a (por reperfilamento do talude, por exemplo), foram apenas assinalados movimentos ocorridos após essas intervenções, uma vez que, para essa data, se perdeu a referência da localização da crista.

É de assinalar que a delimitação da área perdida nos movimentos registados por fotointerpretação está afetada da incerteza decorrente de uma estimativa visual uma vez que a delimitação pelo método referido de uma crista de arriba em coberturas aéreas mais antigas é praticamente impossível devido à ausência de informação topográfica e ortofotos contemporâneas, com a resolução necessária.



Figura 8 - Exemplos de ocupação de estruturas antrópicas no setor Litoral de Torres Vedras. Estrada de acesso a praia junto à Praia da Amoreira (A); Estrada de alcatrão com acesso à Praia de Santa Cruz com edifício construído no talude (B).

3.2.1.4 Comparação de resultados

A experiência do operador nas tarefas de fotointerpretação e estereorrestituição fotogramétrica condiciona fortemente os resultados de cada método. Na comparação que se apresenta teve-se em conta a formação e experiência de cada operador, como se indica de seguida:

- Fotointerpretação: Geólogo, em realização de trabalho de mestrado, sem experiência prévia de fotointerpretação e deteção de movimentos de vertente. A execução do inventário demorou cerca de 4 meses, observando sistematicamente 4 coberturas aéreas de diferentes datas e escalas, em estereoscopia. Background académico em geomorfologia e geologia.
- Fotogrametria/estereorrestituição: Engenheiro Geógrafo, em realização de trabalho de mestrado, sem experiência prévia de estereorrestituição. Sem background académico de geomorfologia ou geologia. Ao trabalho de orientação fotogramétrica das duas coberturas fotográficas e a estereorrestituição foram dedicados cerca de 6 meses.

Como já referido no Capítulo 1, cientificamente, uma arriba pode ser definida como um declive escarpado no litoral no qual atuam processos marinhos e outros processos erosivos sub-aéreos, mas cuja principal fonte de evolução advém da atuação direta da ondulação marítima (arriba ativa). Exclusivamente do ponto de vista do ordenamento territorial, a delimitação das zonas de arriba deverá ser feita na escarpa mais recuada, seja esta correspondente ou não à crista ativa, de forma a contemplar a maior proximidade a propriedades ou elementos construtivos (estradas, património, etc.). No contexto do projeto CISML, era pretendido que se definisse a crista de arribas ativas, uma vez que são estas as que sofrem evolução natural por ação da agitação marítima através de movimentos de massa e, por isso, representam o fenómeno erosivo a estudar.

Em termos de interpretação morfológica do terreno, o operador de fotointerpretação tinha formação suficiente para fazer a correta distinção entre o elemento “crista de arriba” (ativa) e escarpas, cristas secundárias ou taludes artificiais. Embora com alguma supervisão, houve, para o operador de fotogrametria, alguma dificuldade na interpretação deste elemento, sendo muitas vezes erradamente delimitado em zonas de escarpa artificial como bermas de estradas no topo da arriba ou cristas secundárias mais recuadas relativamente à crista ativa (Figura 9, Esq.).

No entanto, em zonas de fácil identificação da crista da arriba, as linhas registadas por fotointerpretação e por estereorrestituição são praticamente coincidentes, diferenciando-se apenas pelo maior nível de detalhe conseguido na estereorrestituição (Figura 9, Dir.), e pelo facto de esta linha, obtida por fotogrametria, ser tridimensional.



Figura 9 – Esquerda: Diferenças entre a delimitação da crista da arriba em 2002, por fotointerpretação, e 2010 por estereorrestituição. Neste local não se verificou recuo da crista da arriba, pelo que se está perante um erro de interpretação da morfologia por parte do operador de restituição. Direita: local onde a delimitação das cristas de arriba coincidem, num local sem registo de movimentos, mas onde é visível o maior detalhe na definição da crista pela estereorrestituição.

Como seria de esperar, à exceção dos pontos em que se intersejam, existe sempre um afastamento de dimensão variável entre as linhas delimitadas por fotointerpretação e por estereorrestituição devido, como referido, às diferentes interpretações do elemento crista de arriba e da delimitação planimétrica vs. tridimensional. Foi feita uma breve análise desse afastamento de forma a, posteriormente, se poder avaliar os movimentos registados por fotointerpretação contra os registados por fotogrametria.

Assim, as linhas representativas da crista de arriba, vetorizadas e estereorrestituídas, foram divididas em segmentos de igual comprimento. Não sendo os comprimentos totais iguais para as duas linhas - cerca de 20 km para a crista de arriba delimitada por fotointerpretação e 17.2 km para a crista estereorrestituída -, ambas foram divididas em segmentos de 20m, com início em zonas correspondentes, para a determinação do afastamento entre elas: a primeira foi dividida em 999 segmentos e a última em 860 segmentos. Aplicando uma ferramenta de proximidade em ambiente SIG, foi calculado, para cada segmento da crista estereorrestituída (2010), o afastamento relativamente à crista fotointerpretada (2002). Este afastamento foi calculado apenas para a componente planimétrica uma vez que a crista fotointerpretada não é tridimensional, utilizando a ferramenta *Near* do ArcGIS 10.3, sendo o afastamento máximo calculado de 89m (<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/how-near-analysis-works.htm>).

As estatísticas desta comparação podem ser observadas na Figura 10 e na Figura 11.

Fotogrametria vs. Fotointerpretação

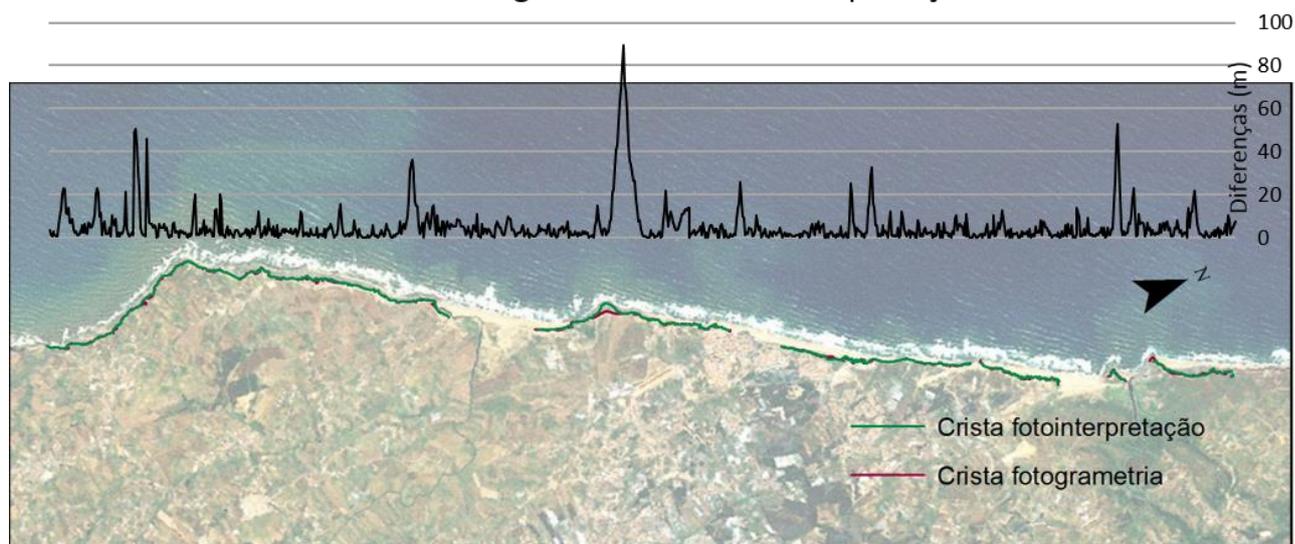


Figura 10 – Distanciamento entre linhas representativas da crista da arriba por fotointerpretação e fotogrametria ao longo de todo o setor litoral estudado.

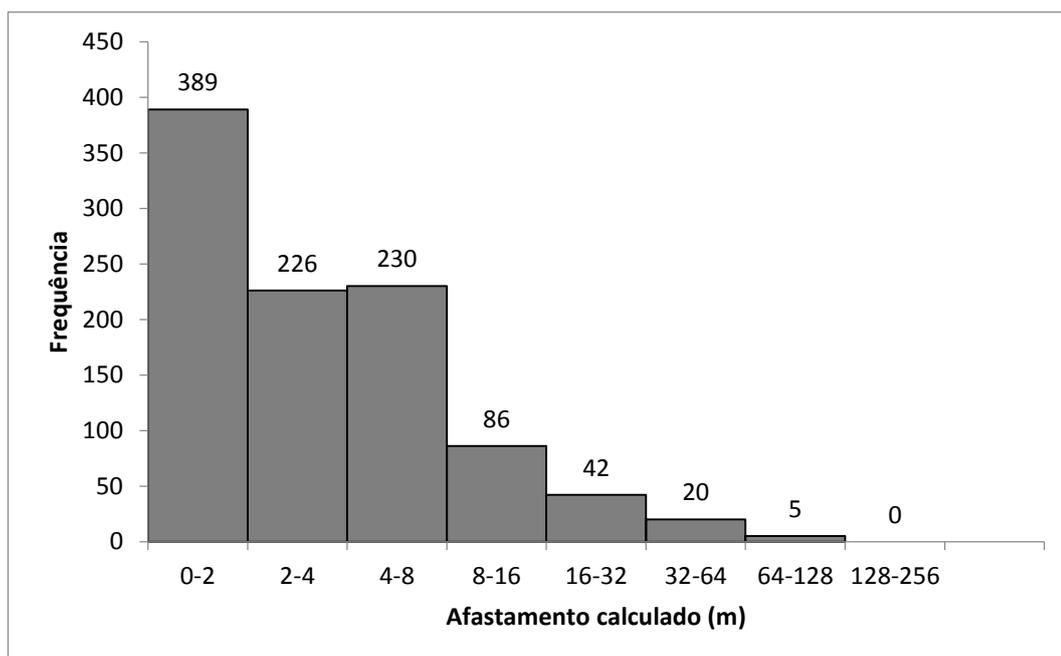


Figura 11 - Frequência dos valores de afastamento calculado pela ferramenta Near entre as duas linhas de crista.

No que respeita a deteção de movimentos por estéreo-fotogrametria, a comparação direta entre as linhas das cristas de 1943/47 e 2010 produziu 99 alterações. Destas, 14 casos correspondiam a “avanços” da crista mais recente relativamente à antiga, devido aos erros de ajustamento dos voos, e 85 correspondiam a recuos efetivos das cristas das arribas. Foram então registados 85 movimentos por comparação direta de linhas de crista estereorrestituídas.

Por fotointerpretação sistemática das 4 coberturas aéreas disponíveis, entre 1947 e 2010, foram inventariados 111 movimentos que provocaram recuo da crista das arribas e 16 movimentos na fachada exposta. Os movimentos inventariados ficaram distribuídos da seguinte forma: 6 movimentos entre 1947 e 1958, 43 movimentos entre 1958 e 1980 e 62 movimentos entre 1980 e 2010. Dos 111 movimentos, 63 foram registados com algumas dúvidas e, destes, 21 foram marcados sem comparação estereoscópica por problemas relacionados com a falta de estereoscopia entre pares de imagens.

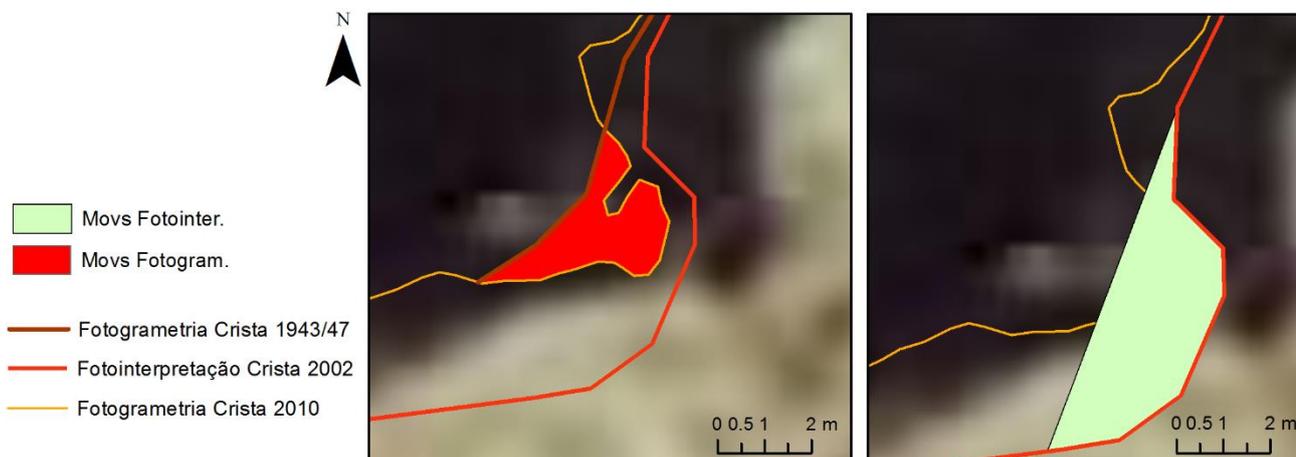


Figura 12 - Diferenças nos resultados das duas técnicas: entre o pormenor de definição da crista da arriba e na definição geométrica do movimento registado.

Um dos elementos caracterizadores de um inventário de movimentos de vertente ocorridos na crista da arriba é a área perdida em cada evento. Comparando as áreas perdidas registadas por ambas as técnicas, verifica-se que os valores obtidos por fotointerpretação são ligeiramente inferiores aos obtidos por comparação de linhas estereorrestituídas (Figura 13).

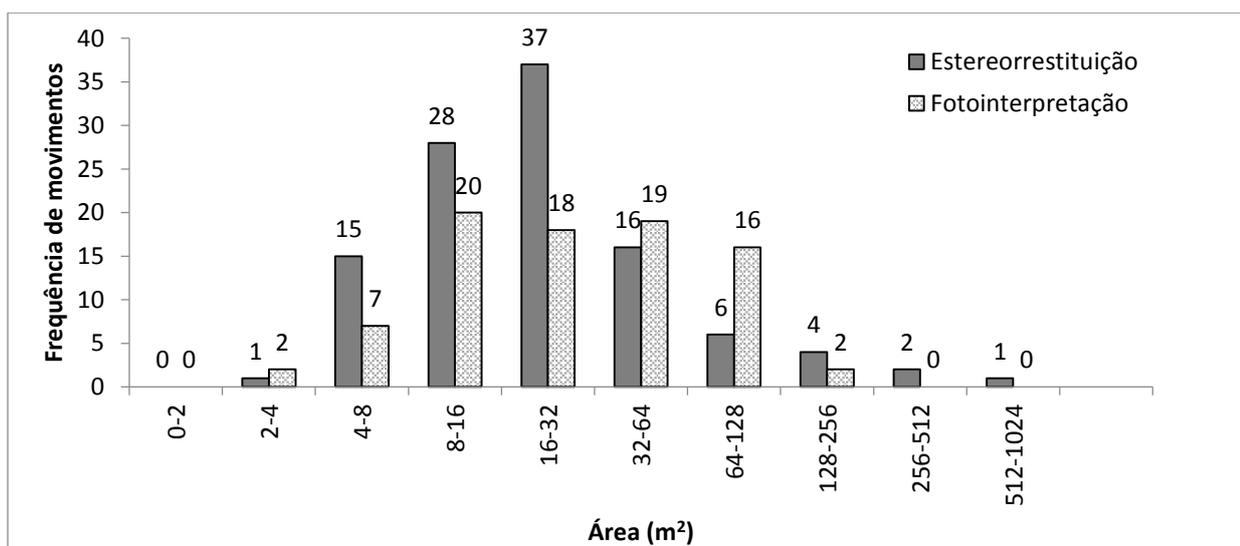


Figura 13 - Distribuição das áreas perdidas na crista da arriba como registadas por fotointerpretação e por estereorrestituição. Os valores mínimos de área perdida registados nas cristas da arriba são de 2.84 e 3.31 m², por fotointerpretação e estereorrestituição, respetivamente, e os valores máximos de área perdida registados nas cristas da arriba são de 538.99 e 601.71 m², também por fotointerpretação e estereorrestituição, respetivamente.

Verifica-se ainda que os resultados obtidos por fotointerpretação revelam uma maior frequência de movimentos com perdas mais pequenas de área do que os obtidos por estereorrestituição devido à maior discretização da janela temporal usada na fotointerpretação como referido.

3.2.1.5 Discussão

Um inventário robusto de movimentos em arribas constitui informação de base indispensável para a determinação da perigosidade e da dimensão das faixas de risco ou de proteção associadas a estas.

Para a determinação dos movimentos ocorridos no setor apresentado, foram utilizadas técnicas de fotointerpretação, baseadas nos métodos descritos em Marques (2006), aplicadas a duas séries de fotografias aéreas: 1942/47 (SPLAL/SCE) e 2010 (Municipia). Foram ainda utilizadas séries de fotografias de datas intermédias para uma melhor discretização da distribuição temporal das instabilidades em arribas. O inventário foi organizado e registado num Sistema de Informação Geográfica concebido de forma a permitir a fácil atualização de informação no futuro. Trata-se de informação bem caracterizada do ponto de vista qualitativo, mas a informação é apenas planimétrica, sendo que os dados relacionados com a morfologia da arriba e dos movimentos registados são retirados diretamente da informação topográfica à escala 1:2000, datada de 2001.

No mesmo setor litoral, foram aplicadas técnicas de fotogrametria aérea a coberturas aéreas de diferentes datas: 1942/47 a 2010. Foi registada a situação de referência, ou seja, a crista e base de arriba à data de 2010. Nos segmentos em que as coberturas fotográficas mais antigas permitiram o processamento fotogramétrico, e um resultado aceitável em termos de precisão, foi feita a comparação direta e sistemática, das linhas estereorrestituídas representativas da crista das arribas, em 3D. Também estes dados foram registados e incorporados num SIG, e caracterizados do ponto de vista qualitativo.

Futuras coberturas aéreas, cujo processamento é atualmente mais simples devido à incorporação de sistemas GPS/IMU, poderão ser trabalhadas e os elementos de interesse (crista ou base de arribas) comparados, sempre tridimensionalmente, com a situação de referência estabelecida e, de forma muito rápida e rigorosa, novos movimentos detetados podem ser adicionados ao inventário.

No presente estudo, realizou-se uma comparação entre duas técnicas de aquisição de dados relativos a movimentos de vertente, com carácter multitemporal, com base em fotografias aéreas: fotointerpretação e estéreo-fotogrametria.

Os resultados obtidos com esta comparação estão afetados por dois fatores que os condicionam profundamente: experiência do operador e o intervalo temporal de registo de movimentos.

Considerando a experiência e o *background* académico dos operadores que procederam à delimitação da crista de arriba neste local, assume-se que a definição do elemento crista de arriba por estéreo-fotogrametria está afetada não só da incerteza posicional associada aos processos de orientação das imagens e da precisão de estereorrestituição, mas também do erro de interpretação da localização da crista. Relativamente à fotointerpretação, a imprecisão deriva fundamentalmente da impossibilidade de marcação tridimensional do objeto recorrendo às curvas de nível com equidistância de 2m e ao mapa de declives para delimitar um objeto irregular do ponto de vista planimétrico e altimétrico. A comparação direta das cristas delimitadas pelas duas técnicas tem de ter em conta a diferença temporal dos dados de base: a crista usada na

fotointerpretação foi delimitada com base em dados de 2002, e a crista estereorrestituída foi delimitada com base em imagens de 2010.

No entanto, há diferenças que não podem ser atribuídas apenas ao facto de as cristas se reportarem a datas que distam 8 anos. Do total de segmentos comparados, 50% dos segmentos apresentam valores de afastamento máximo de cerca de 2m, valor considerado aceitável dentro das incertezas associadas a ambos os métodos.

O maior número de movimentos registados por fotointerpretação (111 registos contra 95 registos por estereorrestituição) deve-se ao facto de o intervalo temporal de pesquisa de alterações na fotointerpretação ser discretizado em 3 intervalos temporais mais pequenos: 1947 - 1958, 1958 - 1980 e 1980 - 2010, enquanto que na fotogrametria os movimentos foram registados num só intervalo de cerca de 60-65 anos. Em certas situações, uma alteração ocorrida entre 1942/47 e 2010 correspondeu, na prática, à acumulação de mais alterações, ocorridas nos menores intervalos observados. Por este mesmo motivo, se explica também a discrepância de áreas determinadas pelas duas técnicas, sendo as calculadas através da comparação de linhas estereorrestituídas maiores que as por fotointerpretação. Na definição das alterações sem a referência de uma crista anterior, o foto-intérprete tendeu a ser mais conservativo na definição da área afetada, de forma a não errar por excesso. Embora as áreas mínimas e máximas registadas utilizando as duas técnicas sejam semelhantes, o somatório das áreas dos 111 movimentos registados por fotointerpretação é cerca de 1/3 do valor obtido por estéreo-fotogrametria (4587.8 m² vs. 14560.7 m²), sendo em consequência bastante conservativo e correspondendo a estimativa por defeito da evolução das arribas.

Conclui-se que a escolha da técnica a aplicar na inventariação de movimentos em arribas litorais deve ainda considerar os seguintes aspetos:

- A utilização de diferentes levantamentos fotográficos aéreos para processamento fotogramétrico exige a georreferenciação individualizada de cada conjunto de imagens com coordenação de pontos fotogramétricos, exceto nos casos em que o sistema GPS/IMU tenha sido utilizado (voos mais modernos apenas), requerendo formação específica em fotogrametria;
- Por fotointerpretação, os levantamentos fotográficos aéreos de diferentes datas são apenas alvo de observação estereoscópica sistemática, sem preocupações de georreferenciação rigorosa, tornando o processo mais rápido do que o anterior; é importante salientar o caso de estudos à escala regional que abrangem regiões extensas: na posse dos dados de orientação externa das imagens, situação apenas verificada nos voos mais recentes, a fase de processamento fotogramétrico é consideravelmente mais rápida e, portanto, pode-se considerar que as técnicas se igualam em termos da rapidez com que se atingem os resultados;
- Por se tratar de uma operação tridimensional, a fotogrametria permite a definição geométrica rigorosa dos movimentos detetados e a quantificação dos erros associados a esta definição;
- No caso da fotointerpretação, à exceção da visualização, todo o processo é conduzido em 2D com as limitações inerentes. Possui porém a vantagem de, em muitos casos permitir avaliar o tipo de movimento ocorrido.

3.3 Fotogrametria Terrestre

Tal como na fotogrametria aérea, também a fotogrametria terrestre utiliza o modelo matemático da projeção central para determinar a localização 3D de todos os pontos de um objeto alvo de cobertura fotográfica. Pode dizer-se que o parâmetro diferenciador entre fotogrametria “aérea” e “terrestre”, para além da óbvia diferença na plataforma de obtenção das imagens e a distância ao objeto de interesse, é a dimensão desse objeto, que varia normalmente entre 0.5 m e 200 m (Luhmann *et al.*, 2014).

Por se tratar de um processo fotogramétrico, também na fotogrametria terrestre a reconstrução do objeto de interesse é precedida da determinação das orientações interna e externa das imagens que o representam. O processo de determinação dos parâmetros de orientação interna em fotogrametria é referido como calibração. Estes parâmetros consistem nas coordenadas do ponto principal, distância focal e parâmetros que descrevem os erros ou desvios causados pelas distorções radial e tangencial da objetiva.

Os métodos de calibração existentes variam de acordo com o tipo de câmara (métrica, semi-métrica e não métrica ou standard) e o objetivo para o qual a câmara será ou foi utilizada. A calibração pode ser realizada em laboratório, em campos de calibração exteriores ou em gabinete e ainda pode ser realizada uma auto-calibração. Em todos os casos, a calibração consistirá na recuperação do modelo geométrico da câmara.

Ao contrário da fotogrametria aérea, em que as câmaras usadas são métricas, a grande maioria das câmaras utilizadas em fotogrametria terrestre são câmaras *standard* ainda que de elevada qualidade. As câmaras não métricas sofrem variações ao longo do tempo e com a utilização, resultado de estruturas óticas e mecânicas pouco estáveis ou pequenas variações na focagem das lentes.

Dentro desta gama, muitas câmaras digitais permitem fazer variar com facilidade a distância focal das objetivas, facilitam a definição da focagem (muitas vezes automaticamente) e do *zoom*. No entanto, com exceção das distorções associadas ao sensor, todos estes componentes podem ser controlados manualmente pelo operador, sendo que a utilização de objetivas de focal fixa dão melhores garantias de estabilidade. Muitos parâmetros das câmaras digitais são gravados no ficheiro EXIF que acompanha cada imagem capturada, nomeadamente a distância focal nominal, parâmetro fundamental para a definição da geometria da câmara. No entanto, mesmo assumindo que este valor se mantém ao longo do levantamento fotogramétrico, ficam por determinar as coordenadas do ponto principal e as distorções associadas às lentes, pelo que a calibração é sempre necessária.

Atualmente, a utilização de câmaras analógicas em levantamentos fotogramétricos está praticamente ultrapassada mas levantamentos com cerca de uma década poderão ainda ser facilmente encontrados em formato de filme. Nestes casos, para além da mesma possibilidade de ajuste da distância focal e *zoom* entre imagens de um levantamento, não existem marcas fiduciais ou garantias de boa planificação do filme no momento de obtenção da imagem, pelo que a recuperação do modelo geométrico da câmara se torna significativamente complexo. Na ausência de um modelo geométrico da câmara determinado na data do levantamento analógico, o processo de calibração é bastante mais difícil que no caso de câmaras digitais.

Dada a variedade de câmaras existentes e objetivos a atingir, existem diferentes métodos de calibração, largamente aprofundados em literatura de referência (Berberan, 2003; Luhmann *et al.*, 2013; Wolf *et al.*, 2014; entre outros).

As aplicações mais comuns de fotogrametria terrestre utilizam as já referidas câmaras digitais *standard* que devem ser calibradas frequentemente, imediatamente antes e/ou depois de cada levantamento fotográfico de forma a garantir que as condições de obtenção das imagens do objeto de interesse são refletidas nas imagens de calibração e, assim, se atingem os melhores resultados. A calibração da câmara usada no decurso deste trabalho foi realizada sempre antes ou depois de cada campanha de levantamento fotogramétrico terrestre, com recurso a um painel fixo de alvos reconhecidos pelo *software* utilizado nesta operação (Figura 14).

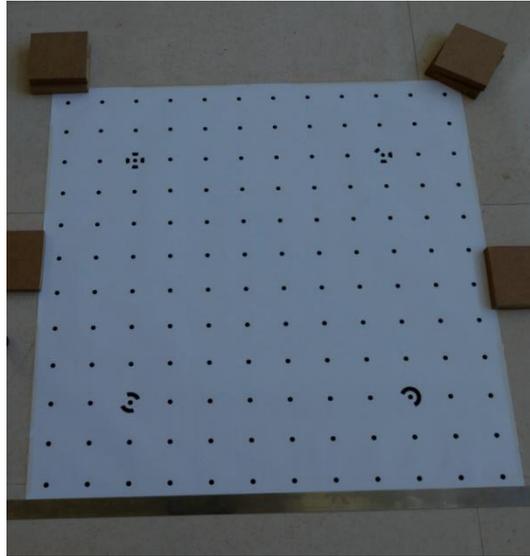


Figura 14 – Padrão de alvos de calibração do *software* Photomodeler Scanner.

Antes de iniciar a sua utilização em campanhas de monitorização, foi necessário fazer diversos testes, tanto de calibração da câmara Nikon D80 e objetivas, como testes de aplicação da câmara à fotogrametria terrestre, utilizando o *software* Photomodeler Scanner (Eos Systems Inc).

Um levantamento de teste, com uma objetiva Tokina de focal de 17mm acoplada à Nikon D80, revelou fraca qualidade na geração do modelo tridimensional e, no terreno, verificou-se ser necessário rever cuidadosamente procedimentos relativos a logística e pessoal necessário à correta prossecução do levantamento: foram detetadas algumas lacunas a nível de equipamento e algumas dificuldades inerentes ao próprio ambiente de arriba alta (vento forte, dificuldade de aproximação à crista, dificuldades de acesso, etc.).

Uma condicionante importante surgiu relativamente ao recuo necessário para que a totalidade de arriba, em altura, pudesse ser captada numa imagem. Mesmo em condição de baixa-mar, em algumas zonas do litoral a faixa arenosa disponível é estreita para o recuo necessário. Concluiu-se então haver necessidade de uma objetiva grande angular para este propósito.

Foi adquirida uma objetiva da Samyang Optics Co., Ltd, grande angular, de focagem manual e distância focal nominal de 14mm com abertura máxima de F 2,8 e “chip” de comunicação com a câmara que permite excelentes resultados em termos de resolução e nitidez da imagem e uma significativa melhoria das condições de obtenção das imagens nas áreas a monitorizar (Figura 15).

No caso dos trabalhos realizados e descritos nesta dissertação, foram utilizados os métodos mais adequados tendo em conta a natureza das câmaras fotográficas e dos objetos em estudo. Foi então necessário calibrar a

câmara digital Nikon D80, com resolução efetiva de 10.2 milhões de pixels (Salvini *et al.*, 2001) e com a objetiva de focal fixa 14mm Samyang, e ainda recuperar os modelos geométricos de câmaras analógicas para processamento de imagens provenientes de levantamentos fotográficos mais antigos.

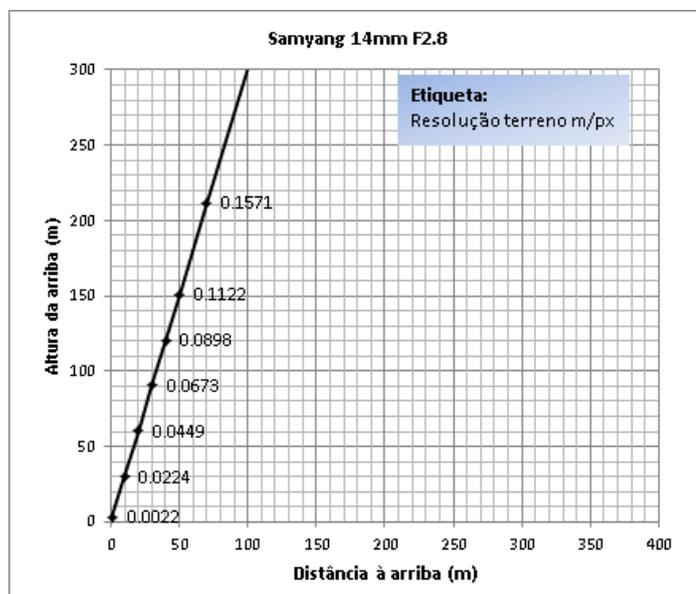


Figura 15 - Recuo necessário à cobertura integral da altura total da arribo numa imagem e a resolução geométrica das imagens obtidas.

Tabela 3 – Resultados da calibração da câmara Nikon D80 com uma objetiva Samyang.

Parâmetros	Nikon D80 Samyang
Distância focal (mm)	15.1130
Largura do sensor (mm)	24.0023
Altura do sensor (mm)	16.0661
X Ponto principal (mm)	11.9413
Y Ponto principal (mm)	7.9002
K1 (mm ⁻²)	6.051e-004
K2 (mm ⁻⁴)	-9.917e-007
K3 (mm ⁻⁶)	0.000e+000
P1 (mm ⁻²)	0.000e+000
P2 (mm ⁻²)	0.000e+000

Após calibração da objetiva, um novo teste foi realizado num edifício da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Tratando-se de uma fachada de geometria retilínea simples, facilmente se percebe a existência de distorções na imagem original que, na imagem corrigida das distorções, não existem (Figura 16).

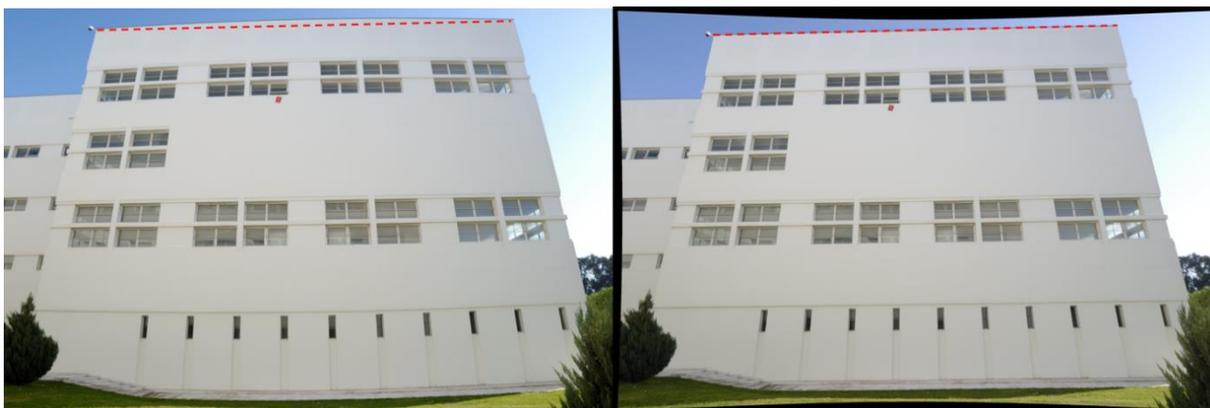


Figura 16 – Diferenças entre uma imagem original e a mesma imagem corrigida das distorções da lente.

O fluxo típico de trabalho consiste na aquisição de fotos com a câmara fixa num tripé de forma a garantir a qualidade geométrica e nitidez de imagem. A disposição espacial das sucessivas posições de câmara deve garantir a cobertura total da face da arriba ao longo de uma ou várias fiadas com sobreposição suficiente entre fotos para a correlação automática entre imagens, e algumas visadas convergentes para fortalecer a geometria do bloco. Atenção adicional deve ser tida relativamente à relação base/distância, a fim de evitar obstruções provocadas por protuberâncias ou irregularidades nas faces, que é o cenário mais frequente (Figura 17).

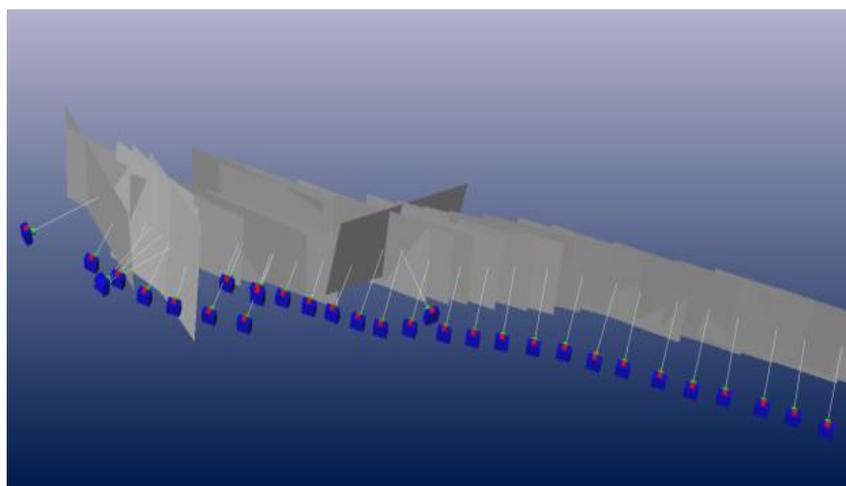


Figura 17 - Layout do levantamento fotogramétrico da fachada de uma arriba.

Apesar de garantir uma distância segura de trabalho, o levantamento deve ser feito a partir de uma plataforma estável, perto da arriba, tendo por isso que existir um acesso a essa zona. Arribas cuja face é atuada diretamente pela ondulação, como arribas mergulhantes, por exemplo, não podem ser monitorizadas desta forma.

Uma vez que se assume que alterações na face das arribas têm lugar entre levantamentos consecutivos, é necessária uma referência espacial comum que é estabelecida recorrendo a uma rede de pontos fixos coordenados no local.

Os casos práticos de fotogrametria terrestre que se apresentam nesta dissertação foram todos conduzidos no *software* Photomodeler Scanner 2013 (Eos Systems). O programa permite desenvolver dois tipos de projetos:

calibração de uma câmara e o *standard*. O primeiro é utilizado para conhecer a geometria interna e as distorções da câmara, o que irá servir, num projeto *standard*, para recuperar a orientação interna das imagens obtidas por ela. Neste último, após definida a orientação interna, e utilizando operadores automáticos de deteção de pontos em imagens com sobreposição, é realizada a orientação relativa das imagens, em que são determinados, na maior parte dos casos, dezenas a centenas de pontos homólogos ao longo de imagens sucessivas que partilhem sobreposição. Nesta altura, é necessário realizar a georreferenciação das imagens de forma a calcular a orientação externa destas: tal como na fotogrametria aérea, um mínimo de 3 pontos fotogramétricos bem distribuídos são necessários para realizar o ajustamento, sendo sempre preferível um número superior de pontos. No caso da monitorização da face de uma arriba, esse número deverá ser sempre superior ao mínimo requerido uma vez que se trata de uma única fiada, muitas vezes de comprimento da ordem das dezenas ou centenas de metros, e ter-se-á que distribuir os pontos ao longo dessa fiada de forma a conseguir a melhor precisão. O Photomodeler Scanner realiza então o ajustamento com os pontos fotogramétricos, produzindo um ficheiro onde todos os parâmetros de qualidade são descritos, por imagem e por fiada. A qualidade do ajustamento pode ser avaliada pelo denominado "Final total error", ou o *sigma-naught a posteriori*, que é adimensional e combina a informação dos resíduos associados aos parâmetros da câmara e à marcação de pontos fotogramétricos. De acordo com as especificações do programa, o valor de *sigma-naught a priori* é 1.0, pelo que um ajustamento de boa qualidade deverá apresentar um erro total final igual ou inferior a esse valor. Um projeto que requeira elevada precisão nos resultados, como os que são apresentados neste trabalho, não deverá apresentar um erro total final do ajustamento superior a 2.0. Se o erro total final for muito superior, dever-se-á verificar a calibração da câmara e/ou a precisão dos pontos fotogramétricos e a precisão da sua marcação nas imagens.

Existe ainda um terceiro tipo de projeto que pode ser desenvolvido no Photomodeler Scanner, fundamental no caso em que se trabalhem imagens cuja orientação interna não seja possível de resolver por se desconhecer a câmara utilizada na sua obtenção. Não conhecendo as características da câmara, é necessário derivar os parâmetros de orientação interna a partir de um número mínimo de 6 pontos de controlo por imagem, de forma a recuperar a orientação interna de cada imagem individualmente, utilizando a DLT - Transformação Linear Direta. No decurso deste trabalho, foram utilizadas imagens digitalizadas a partir de negativos de filme provenientes de levantamentos mais antigos realizados com uma câmara analógica e duas objetivas distintas. Perante a fraca quantidade de informação sobre a câmara e objetivas utilizadas, e a ausência de garantias de manutenção de focagem e distância focal assumiu-se que não havia qualquer conhecimento acerca do equipamento e das suas condições geométricas à altura dos levantamentos. Assim, foi necessário atribuir a cada imagem uma câmara de parâmetros desconhecidos que têm de ser calibrados para cada imagem individualmente. Nestes casos, pode-se esperar, dentro das circunstâncias associadas à obtenção e formato das imagens, um valor de erro total final que pode ascender a 15 (Photomodeler Scanner, 2013).

A fotogrametria digital terrestre dá origem a produtos 3D com precisão métrica e resolução espacial elevadas, tais como modelos virtuais em 3D, nuvens de pontos 3D, ortoimagens e mapas verticais. Todos estes produtos representam elementos valiosos para a avaliação temporal e espacial das faces das arribas desde que sejam realizados levantamentos sistemáticos dos objetos de estudo. Assim, informações acerca de zonas de perda e volumes deslocados podem ser determinados.

Para esta técnica, a razão custo-benefício é considerada intermédia. Embora as despesas com aquisição de imagem sejam relativamente baixas, o pós-processamento requer *software* específico e formação fotogramétrica. No entanto, este é um método muito prático, rápido e flexível, na fase de aquisição da imagem.

3.4 Laser scanning Terrestre

A generalização e grande utilidade da técnica LiDAR levou a rápidos desenvolvimentos no campo do manuseamento e praticabilidade do equipamento, havendo atualmente (2016) no mercado um conjunto vasto de *laser scanners* de aplicação terrestre. Foram desenvolvidos diversos sensores que registam a posição e cota de vários milhares de pontos por segundo e a intensidade do sinal refletido, sendo possível uma aferição da qualidade dos dados obtidos.

Levantamentos com *laser scanner* terrestre têm sido utilizados nos últimos anos para a aquisição de dados 3D de diferentes morfologias, com base no tempo de voo e orientação espacial de um feixe de laser refletido pelo objeto ao longo de um varrimento. Os parâmetros recolhidos por um equipamento deste tipo são a distância percorrida pelo feixe laser, baseada em tempo de voo, o seu azimute e elevação. Estes parâmetros são depois transformados para uma referência espacial local ou global, com coordenadas X,Y,Z. No caso de levantamentos para monitorização é essencial, tal como noutras técnicas de obtenção de dados, que a referência espacial se mantenha ao longo das diferentes épocas de observação para que se possa concluir acerca da evolução do objeto de interesse.

Para a monitorização costeira esta é também uma técnica muito adequada uma vez que oferece uma nuvem densa de pontos 3D descrevendo a face da arriba. As nuvens de pontos devem ser adquiridas a partir de uma ou mais posições fixas, cuja quantidade e localização dependerá das eventuais áreas de oclusão que podem ocorrer devido às irregularidades da face da arriba e/ou geometria de aquisição. Trata-se de uma técnica que requer planeamento cuidadoso sobre o local de posicionamento da estação antes de qualquer campanha de campo, também porque os equipamentos de *laser scanner* terrestre são ainda muito volumosos, sensíveis e requerem fontes significativas de energia (Glennie *et al.*, 2013).

O *laser scanner* tem de ser estacionado sobre uma plataforma fixa, que se mantenha estável durante a operação de varrimento, que pode demorar várias horas, mas a distância à face da arriba pode ser consideravelmente grande, sem deterioração relevante da precisão dos dados. A georreferenciação das nuvens de pontos é, mais uma vez, obrigatória para avaliação de alterações dentro do âmbito da monitorização temporal.

O investimento necessário para aplicar esta técnica é muito elevado, tanto para o *software* de processamento e formação, bem como para a compra de equipamentos ou *outsourcing*. Como exemplo, considerando apenas os equipamentos utilizados neste trabalho, a relação entre *laser scanning* e fotogrametria terrestre é da ordem de 30:1.

No caso dos trabalhos realizados no âmbito desta dissertação foram utilizados os *laser scanners* terrestres Leica ScanStation C10 e Topcon 3D Laser Scanner GLS-1500.

As especificações dos dois equipamentos estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações dos laser scanners terrestres utilizados.

	Leica ScanStation C10	Topcon 3D Laser Scanner GLS-1500
Tipologia	Tempo de voo	Tempo de voo
Precisão da medição pontual	Posição (de 1 m a 50 m): 6 mm Distância (de 1 m a 50 m): 4 mm Ângulos (horizontal/vertical): 60 μ rad / 60 μ rad (12" / 12")	Posição (de 1 a 150m): Modo Normal: 4 mm; Modo longo: 7 mm Ângulos (horizontal/vertical): 6"
Classe	3R (IEC 60825-1)	Classe 1
Alcance	300 m @ 90% 134 m @ 18% albedo (alcance mínimo de 0.1 m)	Modo Normal: 330 m Modo longo: 500 m @ 90% Modo Normal: 150 m Modo longo: 230 m @ 18% (alcance mínimo de 1 m)
Taxa de emissão	Até 50,000 pontos/seg.	30,000 pontos/seg.
Resolução		
Spot size	De 0 a 50 m: 4.5 mm (FWHH) ou 7 mm (Gaussian)	De 1 a 40m: <6 mm
Espaçamento pontos	Selecionável na horizontal e vertical	1 mm a 20m
Ângulo de visão	Horizontal 360° (max) Vertical 270° (max)	Horizontal 360° (max) Vertical \pm 35° (max)
Peso	13 Kg (sem baterias)	16 Kg (sem baterias)
Dimensões (comprimento x largura x altura)	238 mm x 358 mm x 395 mm	240mm x 240mm x 410 mm
Câmara digital incorporada	4 megapixel	2 megapixel

3.5 Imagem hiperespectral

Para a caracterização completa de uma massa rochosa e das suas características geotécnicas, o conhecimento da superfície geológica não é suficiente. No âmbito da informação geológica que pode ser relevante na determinação da probabilidade de ocorrência de movimentos, colocam-se as seguintes questões: quais os

materiais constituintes da fachada? Qual o seu conteúdo mineralógico? Qual o estado de alteração do maciço tendo em conta os materiais que o compõem? Existe circulação preferencial de água? Qual a implicação deste conteúdo geológico e os padrões de fracturação e carsificação no estado de tensão do maciço? A clarificação destas questões reveste-se de enorme importância na avaliação do estado de estabilidade de uma arriba ou de uma escarpa rochosa e, conseqüentemente, na definição do perigo associado a estes elementos.

Por diversas razões de segurança e inacessibilidade, é muitas vezes impossível executar de forma rigorosa e completa os ensaios, sejam eles *in situ* ou laboratoriais (que envolvem a recolha direta de amostra da fachada) que completam uma análise geológica e geotécnica de qualidade, com execução de cartografia de pormenor. A própria definição do local de execução dos testes e de recolha de amostras está absolutamente condicionada ao que o observador analisa no terreno ou mesmo no modelo digital virtual, uma vez que apenas se pode reportar ao visível.

Franceschi *et al.* (2009) testou as diferenças de intensidade de reflexão do sinal de lidar terrestre na identificação da composição do terreno. Foi possível verificar diferenças na intensidade do sinal SWIR (*Short Wave InfraRed*; 1535 nm) quando refletido por argilas e por calcários, num sector rochoso de alternâncias visíveis de argilas e calcários. O autor recomenda a aplicação do método apenas em sectores de camadas quase paralelas, evitando áreas afetadas por falhas ou dobras. Porém, o contexto geológico é na grande maioria das situações, mais complexo do que o apresentado, o que juntamente com as incertezas associadas à reflexão do sinal em zonas de escorrência de água, fraturas, alteração da superfície, e a impossibilidade de quantificar a abundância dos materiais presentes em cada camada, tornam o *laser scanner* terrestre uma ferramenta pouco adequada para a determinação qualitativa e quantitativa dos materiais geológicos.

No entanto, todos os materiais apresentam reações distintas quando atingidos por radiação fora do domínio visível do espectro eletromagnético, mesmo quando, a olho nu, possam ser indistintos. Assim, tirando partido das “assinaturas” espectrais únicas de cada material, é possível distinguir litologias aparentemente homogêneas, e o seu estado de alteração pela análise da mineralogia constituinte e sua distribuição ao longo das camadas, garantindo que questões cujas respostas apenas poderiam situar-se no domínio subjetivo, limitadas à observação, se situem no domínio objetivo, embora com alguma incerteza associada.

Para registar tal informação à distância, sensores hiperespectrais terrestres que trabalham normalmente no domínio de ca. 1.3 a 2.5 μm do espectro eletromagnético foram muito recentemente desenvolvidos para tentar suprir a necessidade de conhecer com pormenor o conteúdo da fachada instável. Até agora, estes sensores têm fornecido com sucesso informações importantes acerca da mineralogia presente e a sua distribuição espacial (Kurz, 2011).

A imagem hiperespectral, integrada com os dados da fotogrametria e *laser scanners* terrestres, permitirá a caracterização geológica e geotécnica completa, rigorosa, menos dispendiosa a todos os níveis com elevado grau de confiança, de uma fachada instável ou de difícil acesso, não comprometendo a segurança oferecida pela distância, ainda que curta, ao local.

Trata-se ainda de um desafio complementar o processamento das imagens hiperespectrais obtidas em contexto menos favorável para a sua obtenção: condições atmosféricas de mais difícil modelação e correção (presença de aerossol marinho, por exemplo), algumas fachadas orientadas para o quadrante NW-NE (menor incidência da radiação solar) e curta margem de recuo relativamente à fachada rochosa pela natureza estreita das praias de areia, que constituem a plataforma de estacionamento dos equipamentos.

À data, em território nacional, esta técnica foi apenas aplicada no contexto de um teste inicial com uma câmara hiperespectral Xenics na praia da Bafureira. Esta câmara obtém imagens com 256 bandas, na zona do espectro NIR (ca. de 880-1600 μm). Uma breve análise das imagens no *software* ENVI (Harris Geospatial Solutions) permitiu observar variações ao longo da imagem, por junção de diferentes bandas do espectro, que corresponderão a variações não visíveis na imagem a cor verdadeira (Figura 18). É possível, após o processamento das imagens, associar os comprimentos de onda registados a bibliotecas públicas, gratuitas, de assinaturas espectrais como a USGS Digital Spectral Library⁴ ou a JPL Spectral Library⁵, onde se encontram os valores de refletância espectral para várias centenas de minerais, possibilitando a atribuição de semântica à classificação da imagem.

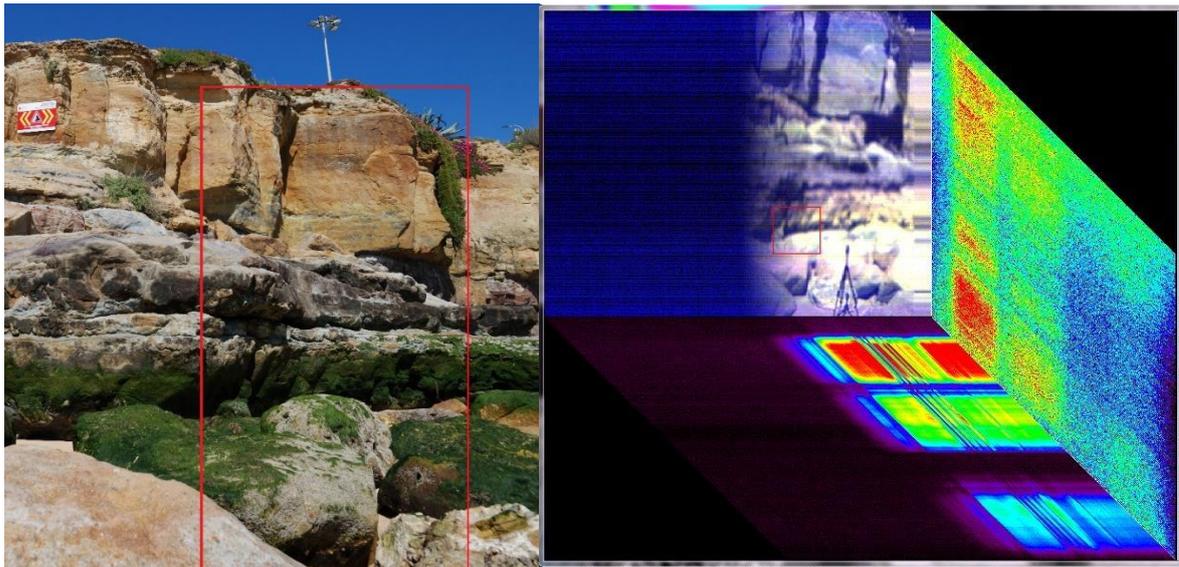


Figura 18 – Cubo hiperespectral formado por todas as bandas da câmara hiperespectral experimentada na praia da Bafureira.

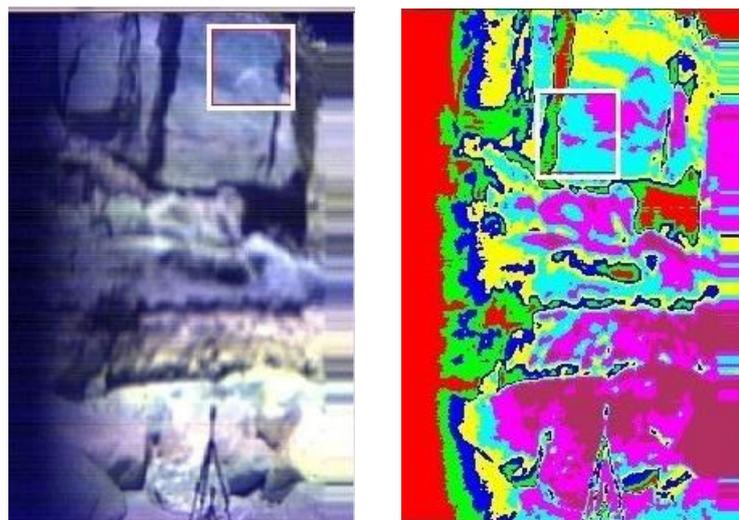


Figura 19 – Classificação automática da imagem hiperespectral com a conjugação de 3 bandas.

⁴ <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>

⁵ http://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jpl_desc

4. Metodologias e algoritmos desenvolvidos

4.1 Produção e processamento de nuvens de pontos

4.1.1 Definição de nuvem de pontos

Na última década, proliferaram as técnicas de aquisição de dados métricos de superfícies de objetos com elevada densidade mas só muito recentemente têm começado a surgir as ferramentas para a análise desses dados (Barnhart e Crosby, 2013). No caso da deteção de alterações na morfologia natural, as comparações necessárias estão a evoluir da simples análise visual para técnicas baseadas em dados quantitativos (pontos, nuvens de pontos, superfícies modeladas, etc.).

DeVore *et al.* (2013) definem uma nuvem de pontos como um denso conjunto finito de pontos tridimensionais de coordenadas X,Y,Z, tipicamente obtido a partir de um sensor ou gerado a partir de imagens usando métodos fotogramétricos de cálculo de coordenadas 3D baseados em algoritmos de correlação automática de imagens.

Pela sua estrutura simples, que pode ser facilmente representada por um ficheiro ASCII com três colunas contendo as coordenadas tridimensionais de cada ponto do conjunto, não se encontra na literatura uma definição ou caracterização específica da entidade “nuvem de pontos”. Linsen (2001) refere-se à nuvem de pontos como um conjunto “desorganizado” de pontos tridimensionais que representam a superfície de fronteira de um objeto, não apresentando qualquer superfície contínua ou faces e, portanto, sem qualquer conectividade entre os pontos que a compõem.

De uma forma genérica, uma nuvem de pontos é composta por um conjunto mais ou menos denso de elementos pontuais com coordenadas tridimensionais (X,Y,Z), sejam elas referidas a um sistema de referência local ou geoespacial, e contém, eventualmente, outros atributos que podem variar consoante a metodologia de aquisição e processamento dessa mesma nuvem. Esses atributos adicionais podem ser a cor verdadeira (R, G, B) no caso de correlação automática de imagens de cor (por fotogrametria) ou no caso da projeção de imagens de cor numa nuvem aquando da utilização de um *laser scanner*, podendo a intensidade de sinal recebido, neste último caso, também ficar registada como atributo.

4.1.2 Representação de superfícies de arriba por nuvens de pontos

A reconstrução tridimensional do objeto representado originalmente por nuvem de pontos passa normalmente pela geração de uma grelha triangular irregular, comumente designada por *TIN*, e pela geração de uma superfície suavizada ou não, através de interpolação ou ajustamento a um determinado conjunto de pontos. Normalmente, para se chegar até a uma superfície que represente cabalmente o objeto de interesse, é fundamental editar a nuvem de pontos. Embora atualmente os algoritmos desenvolvidos para edição

automática, mediante parâmetros definidos pelo utilizador, já permitam um controlo fino da tarefa de edição, é ainda necessária, mesmo que pontualmente, alguma edição interativa da nuvem. Existem diversos algoritmos, baseados em operações de triangulação, que geram a superfície com maior ou menor grau de suavização à custa da diminuição de resolução da nuvem de pontos original.

Estes algoritmos têm sido desenvolvidos e aplicados com bastante sucesso em objetos que se podem aproximar por formas geométricas regulares, normalmente objetos artificiais, por aplicação de modelos matemáticos e respetivo ajustamento a pequenas áreas da superfície a gerar.

O processamento de superfícies naturais irregulares tem sido alvo de menor atenção no que concerne a operação de reconstrução do objeto. No caso específico de fachadas de arribas, frequentemente ocorrem nas nuvens de pontos situações de resolução geométrica heterogénea, oclusões e ruído, desafios que os algoritmos até agora desenvolvidos não conseguem resolver corretamente (DeVore *et al.*, 2013) levando a deficientes reconstruções tridimensionais.

A nuvem de pontos, que constitui o formato básico da correlação automática de imagem ou do levantamento por *laser scanner*, é mais próxima da realidade que a *superfície* gerada a partir dela, na medida em que esta resulta de uma série de operações intermédias que alteram os dados originais como a suavização e a interpolação entre pontos fronteiros a zonas de oclusão (originando informação não real).

No caso da fachada de uma arriba, que constitui um elemento normalmente rugoso, com muitas irregularidades e variações de profundidade, uma superfície interpolada a partir da nuvem de pontos raramente representará tão bem as irregularidades destes elementos como a nuvem de pontos de elevada resolução espacial. De acordo com Mémoli e Sapiro (2004) é importante trabalhar com esta representação em detrimento da *superfície* pois obvia a necessidade de passar por etapas intermédias como o cálculo de ajustamento de uma superfície, introduzindo erros nos dados a analisar. Por outro lado, a elevada resolução de uma nuvem de pontos pode também gerar ruído, devido à grande densidade de pontos, que tem de ser minimizado, sendo esta uma tarefa morosa, muitas vezes quase exclusivamente interativa, que requer uma inspeção visual muito cuidada. O processamento de nuvens de pontos representativas de superfícies naturais como a fachada de uma arriba apresenta, assim, desafios metodológicos e computacionais que antecedem necessariamente a análise geomorfológica (Rychkov *et al.*, 2012).

4.1.3 Detecção de alterações morfológicas usando nuvens de pontos

Um estudo de deteção de alterações em morfologias naturais deverá providenciar informações sobre a área e volume de alteração e a taxa a que essa alteração ocorre, a sua distribuição espacial e qual a precisão dos resultados dessa deteção (Lu *et al.*, 2004). O estudo de deteção de alterações é aplicado a uma grande variedade de tópicos desde a análise geomorfológica, monitorização de estruturas e acompanhamento de construções (Olsen, 2013).

Estudos que se focam no levantamento de alterações em morfologias naturais são comuns na literatura pela necessidade de monitorizar essas alterações, mas até muito recentemente estas comparações eram realizadas visualmente, utilizando fotografia aérea ou terrestre e métodos topográficos de baixa resolução espacial. As comparações eram realizadas em 2D ou 2.5D, não sendo por isso adequadas a morfologias mais complexas. De acordo com Lague *et al.* (2013), trabalho onde são exemplificados alguns estudos de monitorização de evolução de superfícies naturais em 3D, o nível de maturidade das soluções existentes, que são de elevada

precisão e resolução, carece ainda de um conjunto de processos de comparação verdadeiramente 3D e os existentes estão pouco adaptados a superfícies naturais de complexidade elevada.

4.1.4 Algoritmos para determinação de diferenças entre nuvens de pontos

No trabalho desenvolvido nesta dissertação, foi usado o software CloudCompare (v. 2.6.1, 2015) para comparar nuvens de pontos. Este é um programa de código aberto, gratuito, desenvolvido no âmbito de um trabalho de doutoramento financiado pela indústria francesa, com o intuito de desenvolver procedimentos de deteção em 3D de alterações em objetos geométricos, lidando com nuvens de pontos muito densas (Girardeau-Montaut *et al.*, 2005).

Neste programa incluem-se, entre outras, duas operações de comparação de dados: *cloud-to-cloud* (C2C) e *cloud-to-mesh/cloud-to-model* (C2M), onde se determinam diferenças entre duas nuvens de pontos e entre uma nuvem e uma *superfície*, respetivamente.

Sendo um programa aberto, tem evoluído com a contribuição de diferentes investigadores, estando neste momento na versão 2.6.2 (Agosto, 2015). Nesta versão é já apresentado como um *plugin* o *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2), um algoritmo que permite uma comparação mais rigorosa entre duas nuvens de pontos adicionando informação sobre o grau de confiança a depositar no resultado (Lague *et al.*, 2013).

A deteção de alterações entre duas nuvens passa sempre por um passo inicial de definição da nuvem de referência e da que será comparada, definição fundamental tendo em conta os diferentes papéis que irão assumir, dependendo do algoritmo utilizado já que o processo de cálculo não é simétrico (Girardeau-Montaut *et al.*, 2005).

O algoritmo base de comparação de nuvens de pontos na aplicação usada é o já referido C2C. Trata-se de um procedimento relativamente simples de análise de vizinhos mais próximos para calcular a distância entre duas nuvens, baseada numa estrutura de subdivisão de nuvens otimizada para lidar com nuvens de grande dimensão num curto espaço de tempo, uma estrutura em *octree* (Figura 20). Esta subdivisão é feita de forma a conseguir uma boa relação entre utilização de memória da máquina e a velocidade de extração de pontos vizinhos (Girardeau-Montaut *et al.*, 2005) e consiste em subdividir regular e sequencialmente em 8 cubos mais pequenos o espaço da nuvem de referência e da comparada até que apenas um ponto esteja dentro dessa célula ou até que se atinja um nível de subdivisão definido pelo utilizador. Rapidamente é localizado o ponto dentro de uma célula na nuvem de referência, o ponto da célula equivalente na nuvem a comparar, e as células vizinhas. A distância entre os pontos é então calculada, admitindo que as células são homólogas e comparáveis.

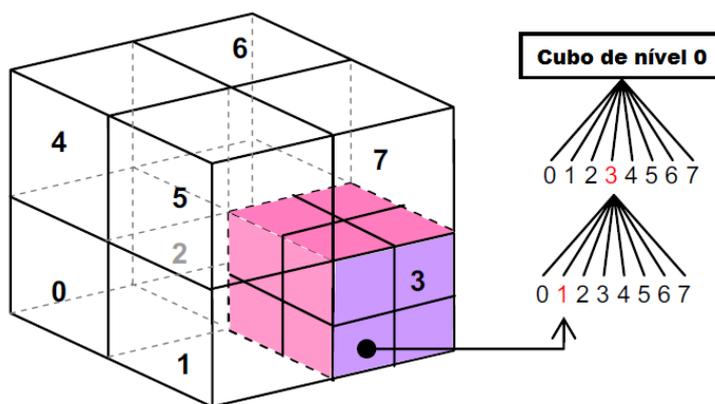


Figura 20 – Estrutura em octree: divisão sucessiva de cubos em 8 cubos cada e codificação do cubo indicado (031) (Girardeau-Montaut et al., 2005).

Para o cálculo desta distância são usadas 3 estratégias que são tanto mais lentas quanto rigorosas. A mais simples, pouco rigorosa e recomendada apenas para uma previsualização de resultados, consiste no cálculo de uma distância média entre o ponto n da nuvem de referência e o ponto n' mais próximo da nuvem a comparar (Figura 21). Semelhante à primeira estratégia é a determinação e aplicação de um plano ajustado pelo método dos mínimos quadrados a cada conjunto de pontos (*best fitting plane orientation*) de cada nuvem e calcular a distância entre esses planos médios. A estratégia mais rigorosa e mais morosa também, é a aplicação da distância de Hausdorff, semelhante à primeira estratégia mas, na subdivisão em *octree*, o ponto n' mais próximo não se encontra necessariamente na célula homóloga e, assim, não se trata do ponto homólogo a n (Girardeau-Montaut et al., 2005). De acordo com os autores, estas estratégias são de confiança apenas no caso de a nuvem de referência ser de elevada resolução espacial, sem lacunas importantes, pois são métodos muito sensíveis à rugosidade, *outliers* e densidade da nuvem. Caso contrário, para se obter uma distância mais próxima da real, podem aplicar-se modelos locais.

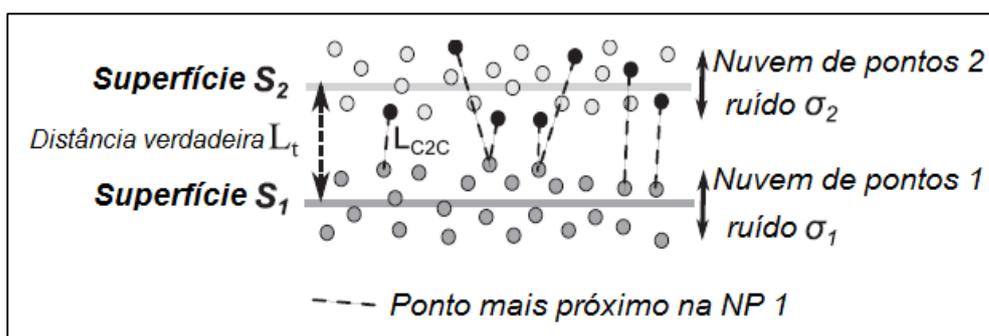


Figura 21- Esquema de cálculo da distância utilizando o algoritmo C2C (adaptado de Girardeau-Montaut et al., 2005).

Foi então desenvolvido, em 2013, o algoritmo M3C2 (Lague et al., 2013) após os autores verificarem algumas fragilidades na aplicação do algoritmo C2C, nomeadamente a grande sensibilidade à rugosidade das nuvens de pontos que não era tomada em consideração nos cálculos. Este algoritmo associa à estimativa da distância um intervalo de confiança e realiza um teste à significância estatística das alterações estimadas (Lague et al., 2013).

Uma das vantagens do algoritmo M3C2 é a definição de um subconjunto representativo da nuvem de pontos de referência, os *core points*. É neste subconjunto que as distâncias serão calculadas e que a significância desse cálculo será projetada. Este subconjunto, apesar de consistir numa percentagem de pontos da nuvem original, pois tem como objetivo acelerar o processo de cálculo sem perda de rigor, pode excepcionalmente consistir na totalidade dos pontos da nuvem.

O processo é relativamente simples para nuvens/morfologias pouco complexas: para cada ponto i é definido um vetor normal (N) a um plano ajustado a n vizinhos que se encontram a um raio $D/2$ de i (Figura 22, a), sendo D a escala definida pelo utilizador, e que deve ser suficiente para representar a rugosidade da nuvem de referência. É então definido um cilindro de diâmetro d e eixo (i, N) , dentro do qual serão definidas duas subnuvens C_a e C_b (da de referência e da comparada). Os pontos dessas subnuvens são projetados no eixo referido. São definidos os pontos médios destas projeções (i_1 e i_2) e a distância entre estes é considerada a distância entre as duas nuvens no ponto i . Os desvios-padrão $\sigma_1(d)$ e $\sigma_2(d)$ dos subconjuntos projetados na normal são uma estimativa da rugosidade local das nuvens e são, juntamente com a dimensão dos dois subconjuntos, usados para estimar o intervalo de confiança da distância (Figura 22, b).

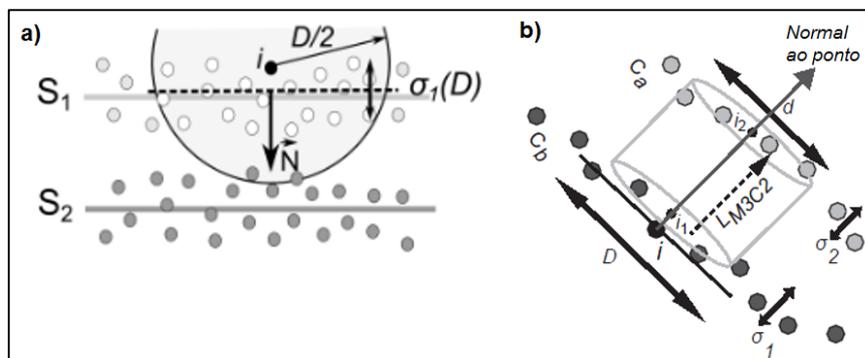


Figura 22 – Esquema de processamento do algoritmo M3C2 no cálculo das distâncias entre duas nuvens de pontos: a) cálculo da normal N no ponto i , na escala D (adaptado de LAGUE ET AL., 2013); b) L_{M3C2} representa a distância medida entre i_1 e i_2 , sendo a rugosidade aparente de cada nuvem, σ_1 e σ_2 , calculada ao longo do vetor normal N (adaptado de Barnhart e Crosby, 2013).

Para superfícies complexas, representativas da maioria das morfologias de arriba estudadas neste trabalho, algumas situações podem ocorrer se a definição dos parâmetros não for a mais adequada, pelo que o processo poderá ter de ser repetido mais do que uma vez de forma a adaptar-se estes parâmetros à rugosidade das nuvens em análise.

No caso em que a orientação da normal à escala d não é paralela à normal estimada para a escala D , $\sigma_1(d)$ será superior à verdadeira rugosidade local, levando à estimativa de um valor superior para a incerteza associada à medição da distância. Uma escala D reduzida, que não incorpora a rugosidade de uma nuvem, poderá levar a situações em que a distância é sobrestimada (Figura 23).

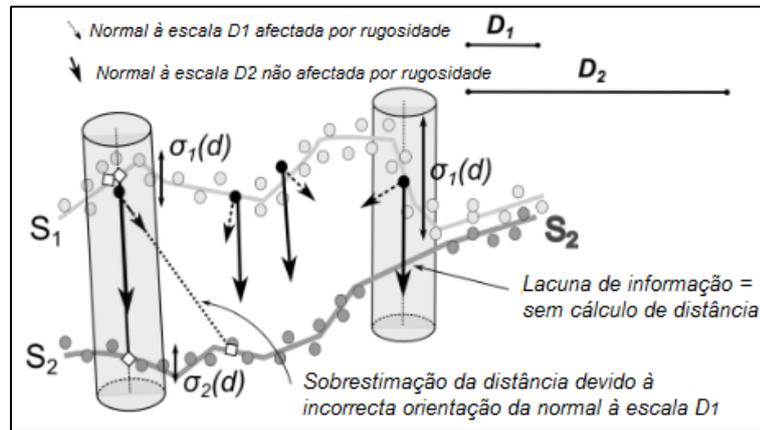


Figura 23– Aplicação do algoritmo M3C2 em morfologias complexas de rugosidade elevada: consequências da subestimação da escala D aplicada no cálculo de distâncias entre duas nuvens de elevada rugosidade – sobrestimação da distância ou lacunas de informação (adaptado de Lague *et al.*, 2013)

Uma escala D ótima deve assegurar a utilização de no mínimo 10 pontos no cálculo da normal, tendo-se registado, em morfologias complexas, resultados com um erro potencial de 2% na medição de distâncias em 97% das vezes (Lague *et al.*, 2013).

Por último, o cálculo do intervalo de confiança e a determinação da significância das distâncias calculadas justificam a passagem da utilização do C2C para o M3C2. Aliás, na primeira fase deste trabalho, apenas o algoritmo C2C foi utilizado para detetar alterações entre nuvens originadas por levantamentos sucessivos. Com o aparecimento do algoritmo M3C2, e após alguns testes comparativos entre as duas metodologias, passou-se a utilizar este último.

O intervalo de confiança é calculado para um nível de 95% (LOD95% - *level of detection at 95%*) e testa se um valor de distância calculado é estatisticamente significativo para se poder afirmar que essa distância corresponde, de facto, a uma alteração da morfologia de uma época para a seguinte.

4.1.5 Nuvens de diferenças: resultado da comparação de nuvens sucessivas

Antes de analisar os resultados da deteção de alterações por comparação de nuvens de pontos de épocas de observação sucessivas, é fundamental compreender que incertezas são inerentes a este processo.

Os principais fatores introdutórios de incertezas no processo de comparação de nuvens são aqueles que afetam cada nuvem isoladamente, isto é, as fontes de erro provenientes (Girardeau-Montaut *et al.*, 2005; Soudarissanane *et al.*, 2011; Lague *et al.*, 2013; Kuhn e Prüfer, 2014; Richter e Döllner, 2014):

- do instrumento/método utilizado na aquisição/geração das nuvens;
- da geometria de aquisição;
- dos erros no registo das nuvens (associado também ao número de estações, no caso do *laser scanner*) e/ou georreferenciação com base em pontos de controlo;
- da edição das nuvens;
- da variação na resolução espacial das nuvens ou alteração da resolução espacial original por pós-processamento;

- da rugosidade do terreno/morfologia e zonas de “sombra” (lacunas de informação).

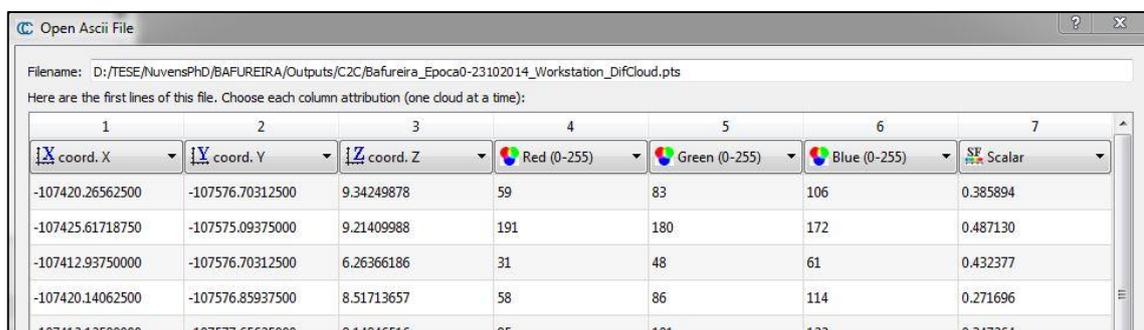
Todos estes erros são propagados no processamento das nuvens e os seus efeitos estão representados no cálculo do intervalo de confiança e, consequentemente, na cartografia de medições significativas da distância retribuída pelo algoritmo M3C2 (Lague *et al.*, 2013).

Uma forma de minimizar os erros ao comparar diretamente duas nuvens de pontos passa por usar uma nuvem de referência densa e mais extensa espacialmente que a nuvem a comparar (CloudCompare, 2015).

É necessário ter especial atenção ao resultado da determinação do intervalo de confiança, que é calculado para cada ponto, em cada operação de comparação entre duas nuvens de diferentes épocas. Em processamentos posteriores, como o cálculo de volumes, este resultado tem influência direta sobre os pontos que são seleccionados para definir *clusters* que representam movimentos de massa – material perdido na face da arriba ou acumulado por queda. Se os parâmetros a usar no algoritmo M3C2, como a orientação preferencial das normais, as escalas de projeção e das normais e, por fim, o erro associado ao registo e/ou georreferenciação, não forem adequados à geometria das nuvens envolvidas nos cálculos, os resultados serão fortemente afetados de forma negativa.

Os dois algoritmos disponíveis no *software* CloudCompare (2015) para comparação direta de nuvens de pontos, C2C e M3C2, procedem de formas diferentes para calcular as distâncias entre as nuvens e, consequentemente, produzem resultados diferentes, oferecendo o último mais informação relativa ao processo, como o já referido intervalo de confiança e as distâncias com sinal.

Ao utilizar o C2C, os valores de distância são associados como um novo atributo a cada ponto da nuvem definida como a nuvem a comparar. Assim, para se salvaguardar essa informação é necessário guardar um novo ficheiro ascii com uma coluna adicional que dirá respeito às distâncias. Este novo atributo pode ser visualizado na nuvem comparada, usando uma classificação de cores em função do valor de distância calculado. É importante sublinhar que o algoritmo C2C apenas calcula diferenças absolutas, não havendo por isso distinção numérica entre erosão e acreção na morfologia estudada. A estrutura do ficheiro final será a mesma do original, com as coordenadas dos pontos da nuvem original, a informação RGB (caso exista) e os valores de distância calculados (x, y, z, R, G, B, C2C_distance) (Figura 24).



1	2	3	4	5	6	7
X coord. X	Y coord. Y	Z coord. Z	Red (0-255)	Green (0-255)	Blue (0-255)	Scalar
-107420.26562500	-107576.70312500	9.34249878	59	83	106	0.385894
-107425.61718750	-107575.09375000	9.21409988	191	180	172	0.487130
-107412.93750000	-107576.70312500	6.26366186	31	48	61	0.432377
-107420.14062500	-107576.85937500	8.51713657	58	86	114	0.271696
-107412.12500000	-107577.65625000	9.14845516	95	101	133	0.247264

Figura 24 – Cabeçalho indicativo da informação constante no ficheiro de output do algoritmo C2C.

No caso da aplicação do algoritmo M3C2, uma nova nuvem é gerada (seja a replicação da nuvem original ou só os *core points*, dependendo da escolha do utilizador) onde constam os valores das alterações com um sinal

associado, o que já permite a separação de alterações que correspondem a perdas ou a ganhos de massa, bem como novos atributos como a incerteza associada ao cálculo das distâncias, a significância da alteração, o desvio padrão de cada nuvem analisada (rugosidade) e o número de pontos vizinhos usados em cada *core point*. Cada um destes atributos pode ser visualizado classificando os valores com uma rampa de cores que represente a variação que se pretende demonstrar.

O ficheiro ascii gerado pode conter a seguinte estrutura: coordenadas dos pontos da nuvem, desvios padrão associados a cada nuvem, distâncias e estatísticas associadas, as componentes da normal calculadas para cada ponto ($x, y, z, std_cloud1, std_cloud2, significant_change, distance_uncertainty, M3C2_distance, N_x, N_y, N_z$) (Figura 25).

Header: X Y Z STD_cloud1 STD_cloud2 significant_change distance_uncertainty M3C2_distance Nx Ny Nz

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-107433.547	-107584.578	3.347	0.000000	nan	0.000000	nan	nan	0.999938	0.007874	0.007874
-107430.594	-107572.234	9.070	0.005873	0.069958	0.000000	nan	0.531050	0.592423	0.801513	0.081313
-107414.992	-107575.016	8.949	0.022477	0.042247	1.000000	0.098750	0.414896	0.562003	0.826474	0.033059
-107419.617	-107576.172	6.435	0.058510	0.102361	1.000000	0.101209	0.494234	0.543521	0.796321	0.265440
-107413.742	-107576.883	10.304	0.011535	0.011700	1.000000	0.098733	0.480450	0.665760	0.715460	0.211385

Figura 25 - Cabeçalho indicativo da informação constante no ficheiro de output do algoritmo M3C2.

4.2 Determinação de volumes a partir de nuvens de pontos

A determinação de alterações morfológicas no terreno a partir da análise de duas superfícies 2.5D georreferenciadas é um problema bem determinado e é aquele mais utilizado na literatura para a análise de alterações morfológicas de uma época de observação para outras.

No entanto, essa solução não é aplicável em casos de morfologias verticais ou quase verticais, ou em casos de fachadas em que ocorrem bancadas rochosas em consola, uma vez que, neste tipo de superfícies, para um mesmo par de coordenadas X,Y vários valores de Z podem ser possíveis, o que requer a consideração da tridimensionalidade da superfície, visto a cota de um ponto deixar de ser uma função das suas coordenadas planimétricas (Figura 26).

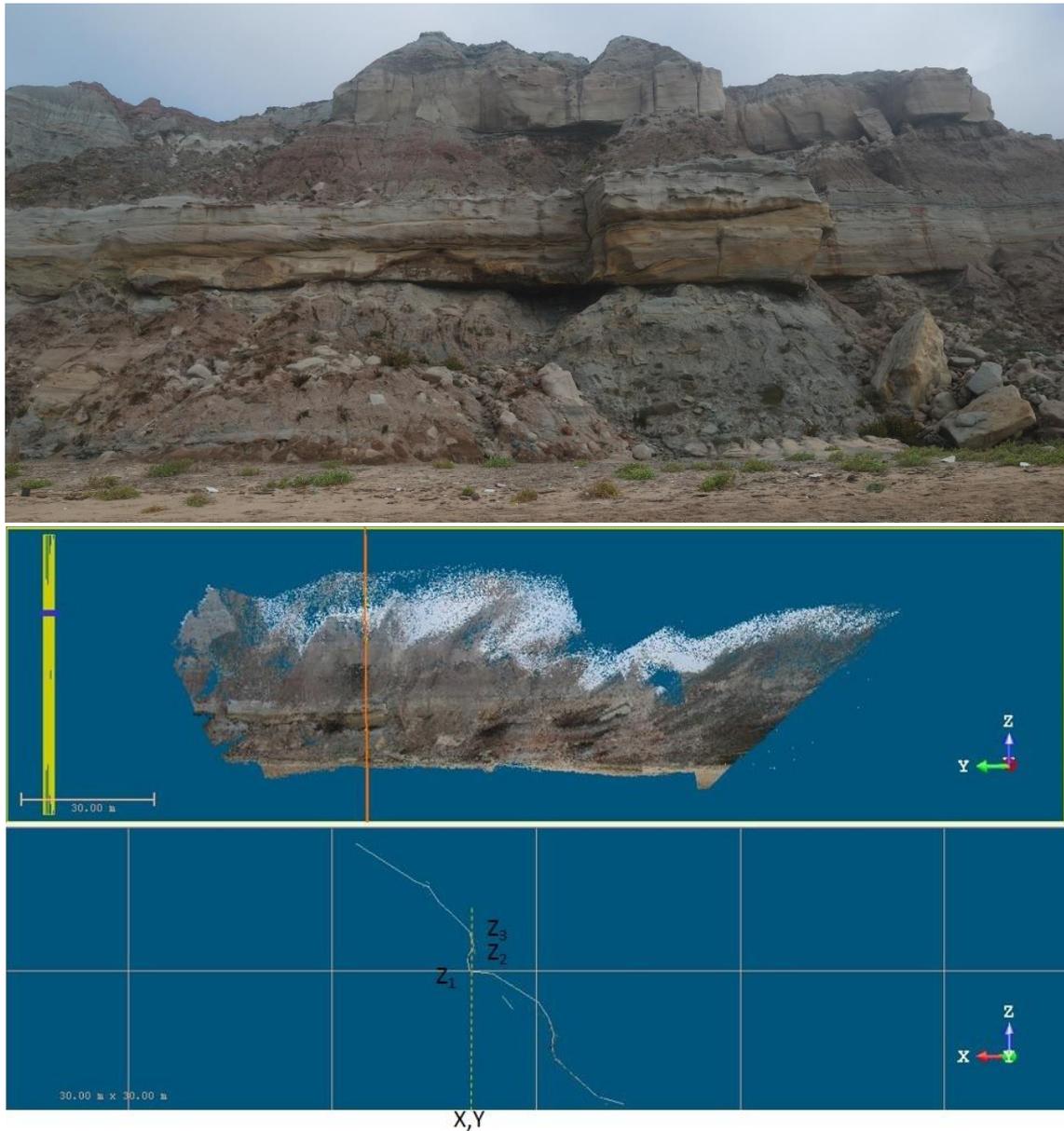


Figura 26 – Exemplo de uma superfície irregular na praia de Valmitão, onde ao mesmo ponto X, Y correspondem vários valores de Z : em cima) imagem de uma face irregular, obtida para processamento fotogramétrico; no centro) nuvem de pontos 3D gerada por correlação de imagens do levantamento fotogramétrico realizado; em baixo) perfil transversal (correspondente ao traçado a laranja na figura do centro) onde se verifica a ocorrência de irregularidades que geram, para o mesmo ponto X, Y , vários valores de Z (Z_1, Z_2 e Z_3).

A análise destas situações em 3D, recorrendo à nuvem de pontos e não à superfície dela gerada, é a mais adequada apesar de apresentar novos desafios: uma nuvem de pontos é uma estrutura desorganizada, e entre duas nuvens de pontos do mesmo objeto não há correspondência direta entre os pontos X, Y, Z de cada uma de forma a poder calcular diretamente o volume das alterações sofridas numa determinada região integrando as diferenças espaciais entre cada par de pontos correspondentes em nuvens de épocas diferentes.

Assim, neste trabalho investigou-se formas de determinar volumes a partir de várias nuvens de pontos distintas.

As diferenças entre nuvens de pontos criadas a partir de levantamentos multitemporais, fotogramétricos ou com *lasercanner*, foram calculadas, como referido no Capítulo 3, utilizando o *software* CloudCompare (2015) e o *plugin* M3C2 (Lague *et al.*, 2013).

A nuvem resultante, contendo, para cada ponto, o valor da diferença entre uma época e outra, sinalizada de acordo com a natureza da alteração – perda ou acumulação de material – é utilizada para o cálculo do volume associado a essa alteração sem sair do processamento na nuvem de pontos.

Para este fim foi primeiramente aplicada a metodologia para o cálculo de volumes em nuvens 3D apresentada em Stumpf *et al.* (2014), que consiste na distinção, na nuvem de diferenças, entre grupos de pontos associados a diferenças negativas e positivas e, dentro destes, na definição de subgrupos desconectados de pontos, denominados “patches” pelo autor e que no texto que se segue se denominam *clusters*. Dentro de cada *cluster*, os pontos são seguidamente projetados num plano de melhor ajuste. Cria-se, de seguida, nesse plano, uma grelha regular com a resolução espacial adequada ao projeto em questão. Sobre a grelha no plano ajustado define-se uma fronteira por uma *alphashape* (α -shape) (Edelsbrunner *et al.*, 1983) aplicada ao conjunto de pontos do *cluster* projetados no mesmo plano. Dentro dessa fronteira interpola-se os valores de diferenças associados aos pontos para todas as células da grelha. Por fim, o volume total do *cluster* (correspondente a um evento de perda ou ganho de material) resulta da soma de todas as diferenças associadas às células multiplicada pela área da α -shape.

Esta metodologia foi, no âmbito desta dissertação, reproduzida em Matlab (2015), no programa VOLTERRE que, lendo o ficheiro de texto com a informação da nuvem de pontos das diferenças provindo do M3C2 do CloudCompare, separa a informação significativa e descarta a não significativa, baseado em indicadores numéricos presentes no próprio ficheiro; dentro destas, separa as diferenças positivas e negativas, define *clusters* de pontos, analisa e filtra os *clusters* de acordo com critérios específicos e projeta os pontos num plano de melhor ajuste. Para além de seguir a metodologia definida por Stumpf *et al.* (2014) acima descrita, o programa VOLTERRE também inclui uma nova metodologia modificada da anterior, que se baseia na α -shape 3D e não necessita da definição de grelhas nem de interpolação de valores.

O ficheiro de saída do M3C2 apresenta tantas linhas quantos os pontos da nuvem. Cada linha correspondente a um ponto da nuvem contém valores para os seguintes campos: *X*, *Y*, *Z*, *std_cloud1*, *std_cloud2*, *significant_change*, *distance_uncertainty*, *M3C2_distance*, *Nx*, *Ny*, *Nz*. Estes são os dados de entrada do programa.

É feita uma primeira filtragem dos dados em que são ignorados todos os pontos não significativos (*significant_change* < 0.95) e, deste conjunto, são formados 2 grupos de pontos: *M3C2_distance* positivo e *M3C2_distance* negativo que corresponderão provavelmente a pontos em zonas de perda ou de ganho de material consoante a nuvem escolhida para referência do cálculo com o M3C2 (a de maior densidade).

Separadamente sobre os dois grupos é aplicada uma série de operações com vista à determinação de volumes perdidos e ganhos, as quais serão explicadas em seguida.

4.2.1 Determinação de *clusters*

O processo de “clustering” consiste na classificação não supervisionada de observações em grupos (Jain *et al.*, 1999) denominados *clusters*, que representam conjuntos de elementos próximos, sendo esta proximidade

definida pela distância entre eles ou por uma função de semelhança. Existe uma enorme variedade de métodos e técnicas de representação dos dados e medição da semelhança/proximidade entre os dados.

Utilizando as ferramentas de análise de *clusters* por hierarquização acumulativa (MathWorks, 2015), foram realizados os seguintes procedimentos sobre os pontos, de acordo com os seguintes parâmetros:

- Determinação da distância entre elementos: $pdist(X)$, função que calcula a distância entre as observações, sendo X a matriz das observações – cada linha é um ponto 3D da nuvem (Figura 27, a);
- Agrupamento dos pontos: $linkage(X, 'average', 'euclidean', 'savememory', 'off')$, função do Matlab que realiza o agrupamento dos pontos da amostra usando como critério a menor distância euclidiana entre pares de pontos determinada no passo anterior. O resultado é uma matriz Z ($m-1 \times 3$) onde m é o número de observações originais de X . As colunas 1 e 2 de Z contêm, na primeira iteração, os índices dos pontos ligados pela menor distância e a coluna 3 contém o índice do *cluster* criado. A partir da segunda iteração, em vez de ser calculada a distância entre pontos é calculada a distância entre centróides dos *clusters* criados. Z conterá agora os índices dos pares de *clusters* mais próximos e o índice do novo *cluster* por eles formado. Este processo iterativo cria uma árvore binária, formada pelas sucessivas ligações de *clusters* que vão sendo determinadas (MathWorks, 2015) (Figura 27, b);
- Determinação do nível de corte da árvore binária de *clusters* (Figura 28): $cluster(Z, 'Cutoff', c, 'Criterion', 'distance')$, função que constrói *clusters* com a informação da árvore Z , de acordo com o valor de *cutoff* c aplicado, isto é, particionando a árvore Z a um nível c abaixo do qual todos os “ramos” inferiores são aglomerados no mesmo *cluster*. O resultado é um vetor com tantas linhas quantas o número de observações, e onde cada linha é o número identificador do *cluster* (MathWorks, 2015) da observação da mesma linha da matriz X das observações, apresentando, portanto, tantas vezes o número do *cluster* quantos os pontos que a ele pertencem.

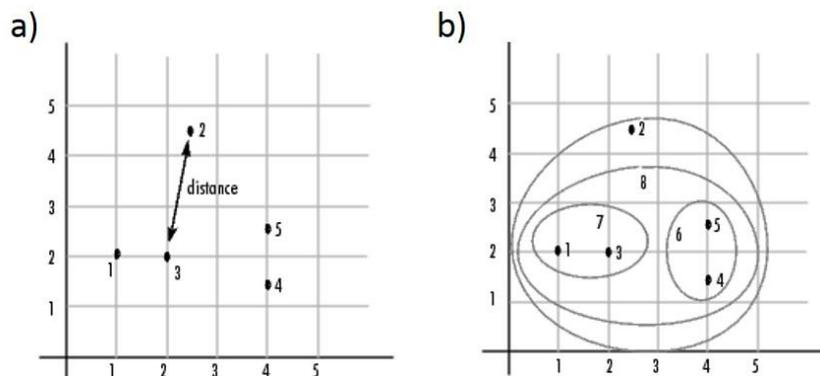


Figura 27 – a) Cálculo da distância entre pontos com a função $pdist$ (exemplo a 2D); b) Agrupamento dos pontos tendo como critério a menor distância euclidiana, usando a função $linkage$ (fonte: MathWorks, 2015).

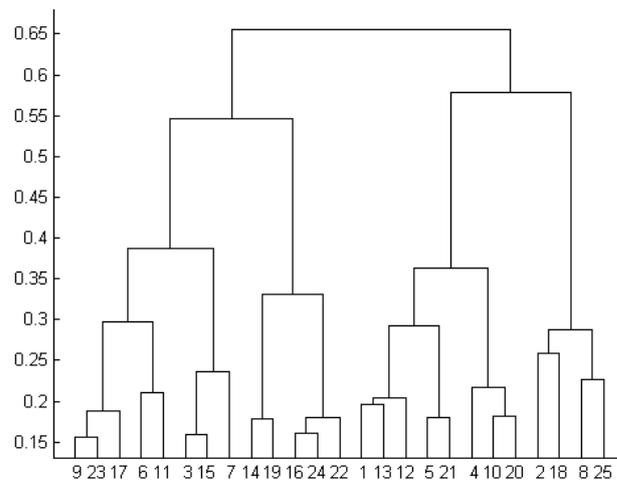


Figura 28 – Dendrograma, ou árvore binária de clusters (fonte: MathWorks, 2015).

O valor de cutoff c a utilizar tem de ser definido em cada caso, tendo em consideração que um valor de c menor vai gerar maior número de clusters (Figura 29). Na definição deste valor deve ser ainda tido em conta que um valor menor de c exigirá maior esforço computacional e o maior número de clusters gerados pode não

corresponder necessariamente ao fenómeno “movimento de massa” numa vertente. O resultado da operação de *clustering* deve ser verificado com cuidado para que não exista ruído em excesso (Figura 30).

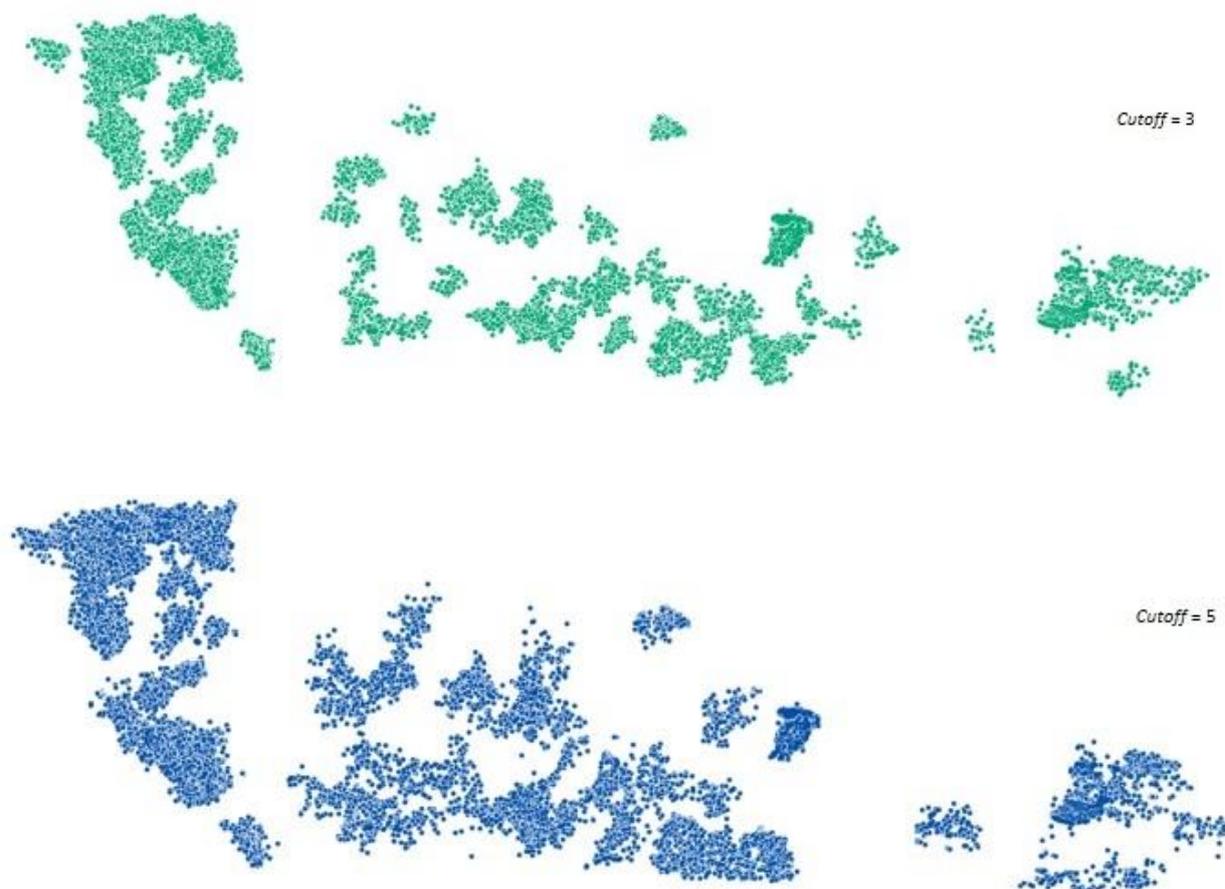


Figura 29- A aplicação de diferentes valores de *cutoff* originam diferentes quantidades de clusters e número de pontos associados, influenciando o que é considerado zona de alteração e respetivo volume a ser determinado: $c = 5$ gerou 53 clusters, enquanto que $c = 3$ gerou 91 clusters

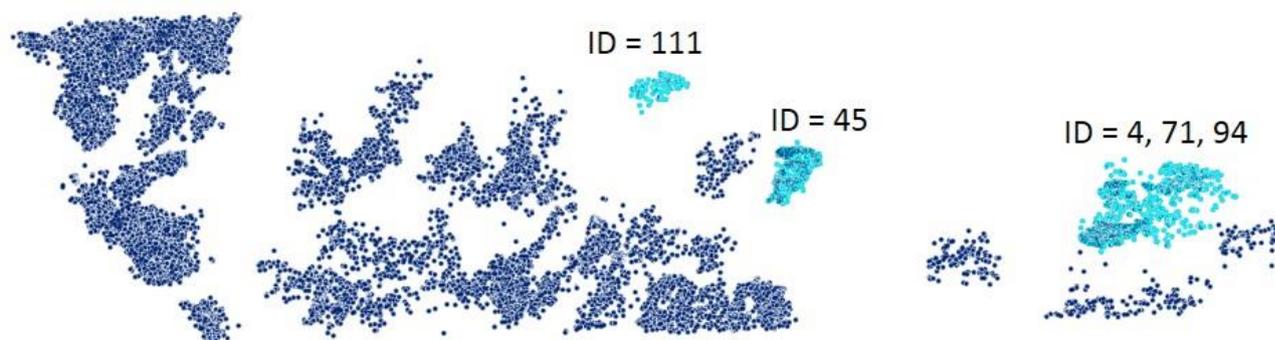


Figura 30 – Assumindo que as três manchas assinaladas a azul claro correspondem a movimentos individuais, verifica-se que a quantidade de clusters definidos é superior. Verifica-se no exemplo do movimento caracterizado pelos Ids 4, 71 e 94 que, apesar do somatório dos volumes ser efetivamente o volume envolvido no movimento, ele é representado por 3 clusters individuais.

De acordo com Stumpf *et al.* (2014), apenas deverão ser considerados os *clusters* com um número mínimo de pontos, a definir de acordo com as características das nuvens, para formarem um *patch*, pelo que uma filtragem pelo número de pontos elimina os *clusters* que não cumprem este critério.

Uma análise do gráfico da projeção dos pontos 3D de cada subgrupo, classificado por cor, permite verificar que existem *clusters* cujos pontos apresentam uma dispersão elevada, pelo que se considerou que o número mínimo de pontos é um critério insuficiente para definir *clusters* de forma clara. Foi então executada uma nova filtragem sobre estes *clusters*, tendo em conta a densidade (número de pontos por unidade de volume do *cluster*).

Para cada *cluster* foi calculada a α -shape (Edelsbrunner *et al.*, 1983; Edelsbrunner *et al.*, 1994) tridimensional, isto é, um sólido cuja fronteira engloba todos os pontos de cada *cluster*.

De acordo com as definições propostas por Edelsbrunner *et al.* (1983) para o caso 2D, generalizável para 3D:

- um ponto p no conjunto S é denominado *extremo* α , se existe um disco genérico fechado de raio $1/\alpha$, tal que p se localiza na sua fronteira e contém todos os pontos de S ;
- se existe um disco genérico fechado de raio $1/\alpha$ que contém na sua fronteira 2 pontos extremos α p e q , e que contém todos os outros pontos de S , então p e q são *vizinhos* α .

Posto isto, dado um conjunto de pontos S no plano e um valor de α arbitrário, a α -shape é o grafo de linhas retas cujos vértices são os pontos α extremos e cujas margens fazem a ligação entre os α -vizinhos respetivos.

O parâmetro mais importante da α -shape é o raio do disco, no caso de dados bidimensionais, ou da esfera, no caso de dados tridimensionais, o qual depende do valor α . No caso dos *clusters* de pontos tridimensionais, o raio da esfera utilizado será o de menor valor possível para que englobe todos os pontos, isto é, levando a que todos os pontos sejam extremos da forma e que esta seja muito detalhada, resultando, por isso, numa forma de limite bastante irregular. Valores mais elevados de $1/\alpha$ tendem a suavizar ou a generalizar fortemente a forma introduzindo, portanto, imprecisões desnecessárias nos cálculos finais da área ou volume dos *clusters* de pontos. O volume desta α -shape é calculado diretamente pela função *volume* do Matlab (bem como a área e perímetro, se 2D, e ainda a área da superfície em 3D).

Considerando a resolução espacial das nuvens de pontos, e tentando manter *clusters* de pontos cuja associação 'número de pontos – proximidade' seja tal que garanta que se trata, de facto, de uma zona de perda ou acumulação de material, foi calculada a mediana das densidades para todos os *clusters* e eliminados os *clusters* que apresentavam densidade inferior a esse valor.

Do processo de análise dos dados originais, após algumas iterações fazendo alterar alguns parâmetros do processo de *clustering* e filtragem de acordo com os critérios descritos, obtém-se um conjunto de *clusters* que, individualmente, são alvo de cálculo de volume com base nos valores de distâncias M3C2 associado a cada ponto do *cluster*. Os dados de saída compõem-se de uma matriz que contém todos os pontos dos *clusters*, as suas coordenadas originais (X, Y, Z), a respetiva distância M3C2 e a identificação do *cluster* a que pertencem.

4.2.2 Cálculo de volumes, áreas e dimensões

A etapa seguinte é já de preparação dos dados para o cálculo dos volumes, a qual passa por ajustar um plano, a cada *cluster* de pontos, calculado minimizando a distância de cada ponto ao plano ao longo da sua normal resultando no plano de melhor ajuste aos pontos 3D (Leygue, 2013).

Neste plano, são projetados os pontos que lhe deram origem através da fórmula 1:

$$q_{proj} = q - \text{dot}(q - p, n) \times n \quad (1)$$

onde q_{proj} são as coordenadas de cada ponto projetado, q as coordenadas de cada ponto original, p , as coordenadas (a,b,c) de um ponto no plano, e n , as componentes (d, e, f) do vetor unitário normal ao plano. “dot” representa o produto interno entre $q-p$ e n , “x” representa o produto externo.

Uma vez projetados no plano, é necessário definir um novo sistema de eixos de forma a conhecer as coordenadas planas de cada ponto projetado. O posicionamento arbitrário da origem do sistema de eixos, P_0 , poderia causar dificuldades no cálculo das coordenadas projetadas devido à possibilidade de se verificarem pontos nos quatro quadrantes. Assim, foi definida a origem do eixo de coordenadas planas num ponto de coordenadas 3D tal que todos os pontos fossem projetados nos eixos positivos dos xx e yy . Este ponto $P_0(x,y,z)$ a calcular tem coordenadas tais que x é o valor mínimo do conjunto de coordenadas x , y é o valor mínimo do conjunto de coordenadas y e z corresponde à cota no plano determinada com base nas coordenadas mínimas de x e y referidas, no ponto p (a,b,c) do plano e nas componentes (d,e,f) do vetor n , segundo a fórmula 2

$$z = \frac{(f \times c - d) \times (x - a) - e \times (y - b)}{f} \quad (2)$$

Assim, o ponto P_0 de coordenadas (x,y,z) é projetado no plano e assume coordenadas planas (0,0). Para definir o eixo dos xx , deste novo sistema de eixos, foi necessário escolher um ponto P_1 o mais afastado possível de P_0 . Esta determinação foi feita calculando a distância de P_0 a todos os pontos do *cluster* projetados e o ponto a que está associada a maior distância foi definido como o ponto P_1 . No plano, P_0 terá coordenadas (0,0) e P_1 terá coordenadas (distância $P_0P_1, 0$), ficando desta maneira o eixo dos xx coincidente com o segmento P_0P_1 .

Uma vez definido o sistema de eixos, as coordenadas planas de todos os pontos P_n a projetar serão calculadas pela expressão 3:

$$P_n = (\text{Dist}P_0P_n \times \cos \alpha, \text{Dist}P_0P_n \times \sin \alpha) \quad (3)$$

onde α é o ângulo entre P_0P_n e P_0P_1 , calculado através do produto interno entre os dois vetores.

4.2.2.1 Determinação volumes, áreas e dimensões

i. Cálculo de volumes

Como referido anteriormente, após a projeção dos pontos de cada *cluster* no plano que melhor se lhes ajusta, o programa VOLTERRE inicia o cálculo do volume de cada *cluster* por duas metodologias distintas, à escolha do utilizador: Stumpf *et al.* (2014) e a modificada.

Detalhando a metodologia de Stumpf *et al.* (2014), a determinação dos volumes ganhos e/ou perdidos numa alteração sofrida por uma morfologia quase vertical ou com bancadas em consola deverá, após todo o procedimento descrito, seguir os seguintes passos, aplicados a cada *cluster*:

1. Ajuste de uma α -shape 2D aos pontos projetados para criar um polígono que engloba todos os pontos (Figura 31);

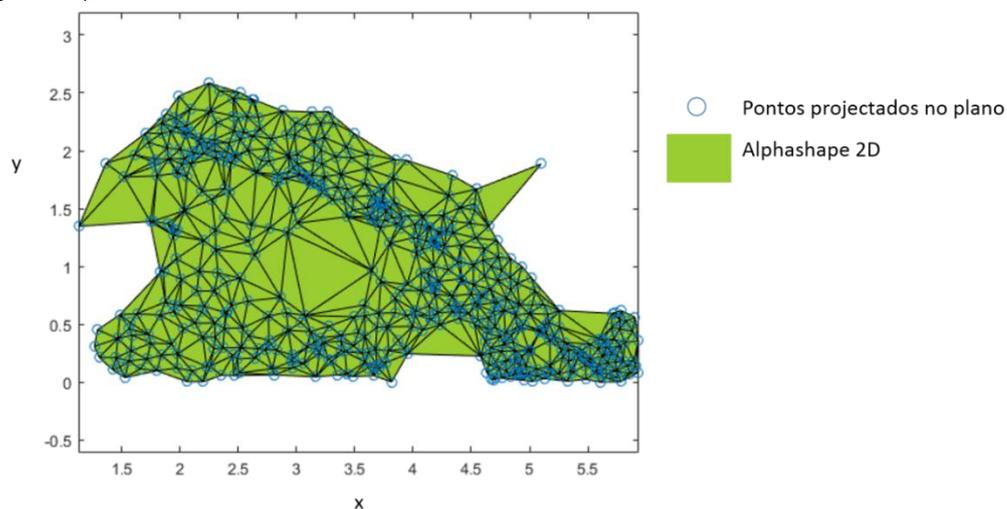


Figura 31 – α -shape como polígono que engloba a totalidade dos pontos de cada *cluster* e define a área de interpolação.

2. Criação de uma grelha regular no plano, onde será obtida uma superfície 2.5D cujas células têm valores interpolados das distâncias M3C2 associadas aos pontos originais. O interpolador usado por Stumpf *et al.* (2014) foi o inverso da distância. No entanto, em Matlab, usando a função *ScatterInterpolant*, os interpoladores possíveis são o vizinho mais próximo, vizinho natural e a interpolação linear. Perante esta situação, o interpolador escolhido foi o baseado no vizinho natural. De acordo com Hemsley (2009), este interpolador apresenta a menor margem de erro em comparação aos outros interpoladores quando aplicado a conjuntos de grande quantidade de pontos, ainda que nas margens da amostra original os resultados sejam de menor qualidade uma vez que não tem em conta o comportamento da amostra e calcula a média dos valores que estão disponíveis para a interpolação. Tendo em conta que existe uma prévia triangulação de Delaunay, a interpolação baseada no vizinho natural proporciona um equilíbrio entre precisão e rapidez de cálculo;
3. Derivação do volume total por multiplicação da área de cada célula que esteja contida na α -shape pelo respetivo valor de distância e soma dos resultados para cada *cluster* (Figura 32).

A metodologia modificada não passa pela criação de uma grelha nem realiza interpolação de valores de M3C2_distance afastando-se menos da amostra original de distâncias.

Após a projeção de todos os pontos tridimensionais no plano de melhor ajuste, aos quais é atribuída a cota de valor 0, cria-se um conjunto de pontos com as mesmas coordenadas x,y projetadas mas com valor de cota igual à respetiva distância M3C2 associada. Os dois conjuntos são concatenados e ao conjunto total resultante, aplica-se uma α -shape 3D, de onde se retira o volume. O volume da α -shape corresponderá ao volume do sólido formado pela tetraedralização do conjunto de pontos no plano à cota 0 e dos pontos homólogos à “cota” M3C2_distance (somatório do volume de cada tetraedro individual) e que corresponde, na prática, ao volume da alteração ocorrida, ainda que as respetivas formas geométricas não sejam iguais (Figura 33).

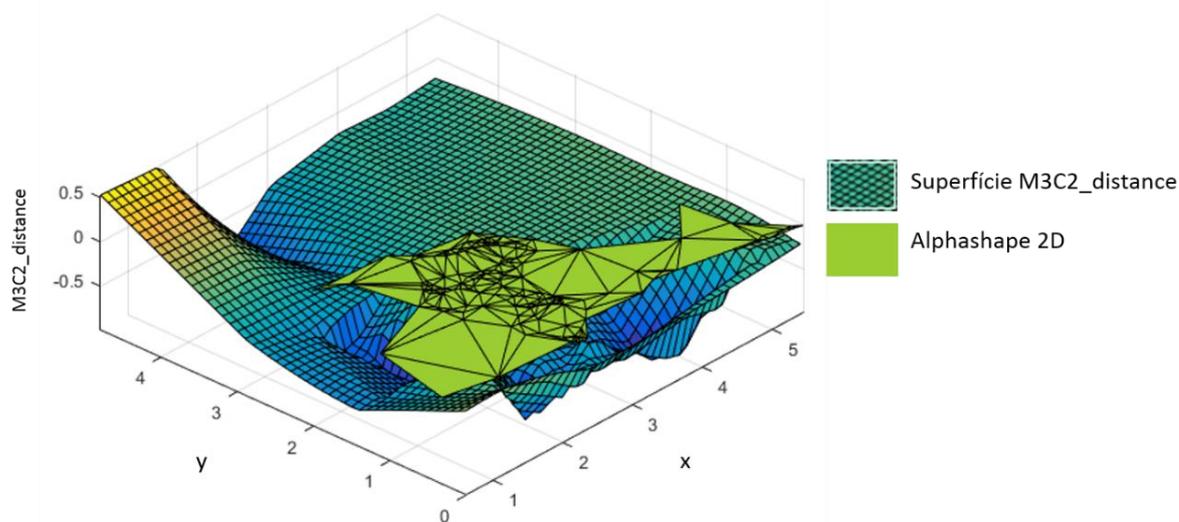


Figura 32 – Representação gráfica da grelha criada, onde foram interpolados os valores de distâncias M3C2 e a α -shape 2D que representa a fronteira do cluster de pontos que são considerados no cálculo final dos volumes.

Tendo em consideração a formulação da determinação de volumes por cada metodologia, utilizou-se um caso de estudo: um talude de estrada de acesso à praia do Porto da Calada (Maфра).

Trata-se de um talude artificial, onde ocorreram vários movimentos de pequenas dimensões entre duas épocas de observação. O material que se perde na face ou crista do talude deposita-se no sopé, não havendo lugar a remoção de detritos. Entre 2012 e 2013, foram calculados 53 *clusters* de material perdido e 52 de material acumulado com os respetivos valores de volumes calculados: foi deslocado um total de 638.84 m³ e acumulado um total de 658.82 m³, de acordo com a metodologia de Stumpf *et al.* (2014) e de acordo com a metodologia modificada foram calculados um total de material deslocado no valor de 632.2 m³ e acumulado de 622.8 m³ (Figura 34).

ii. Cálculo de áreas e dimensões

De forma a compilar um inventário de movimentos que caracterize o melhor possível cada movimento individual é necessário contabilizar a área da face da arriba afetada pelo movimento e as suas dimensões (largura e altura), para além do volume de material perdido no evento.

Para cada *cluster* de perda de material, foi determinada a área, a largura e a altura, a partir da α -shape 2D formada pelos pontos projetados no plano de melhor ajuste ao *cluster*.

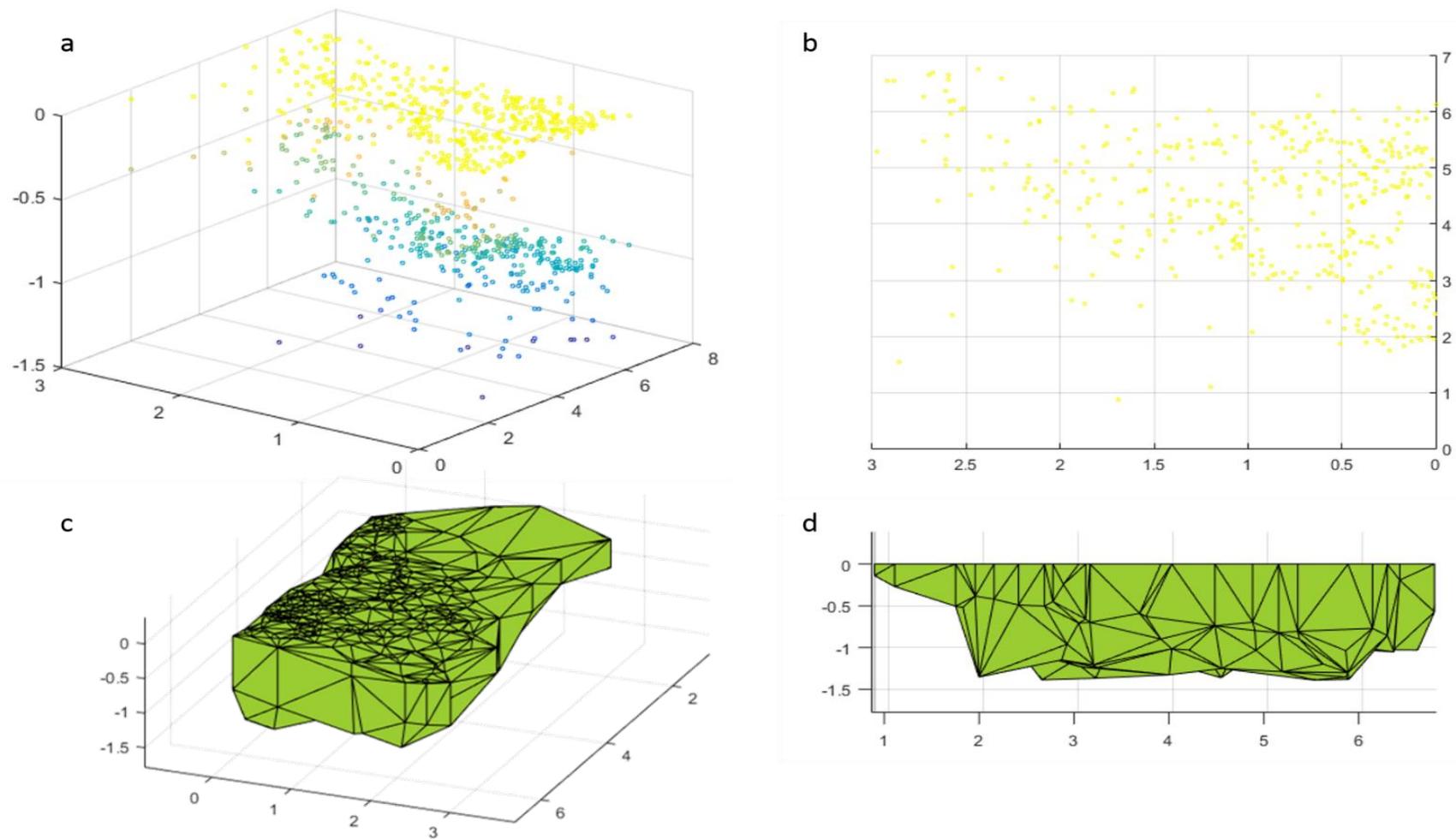


Figura 33 – a) Distribuição dos pontos que formam a α -shape: a amarelo, os pontos projetados do cluster no plano à cota 0, a azul, os mesmos pontos com cota M3C2 e; b) Perspetiva no plano de melhor ajuste dos pontos projetados do cluster com cota M3C2 e no plano; c) e d) Duas perspetivas da α -shape gerada a partir dos dois conjuntos de pontos.

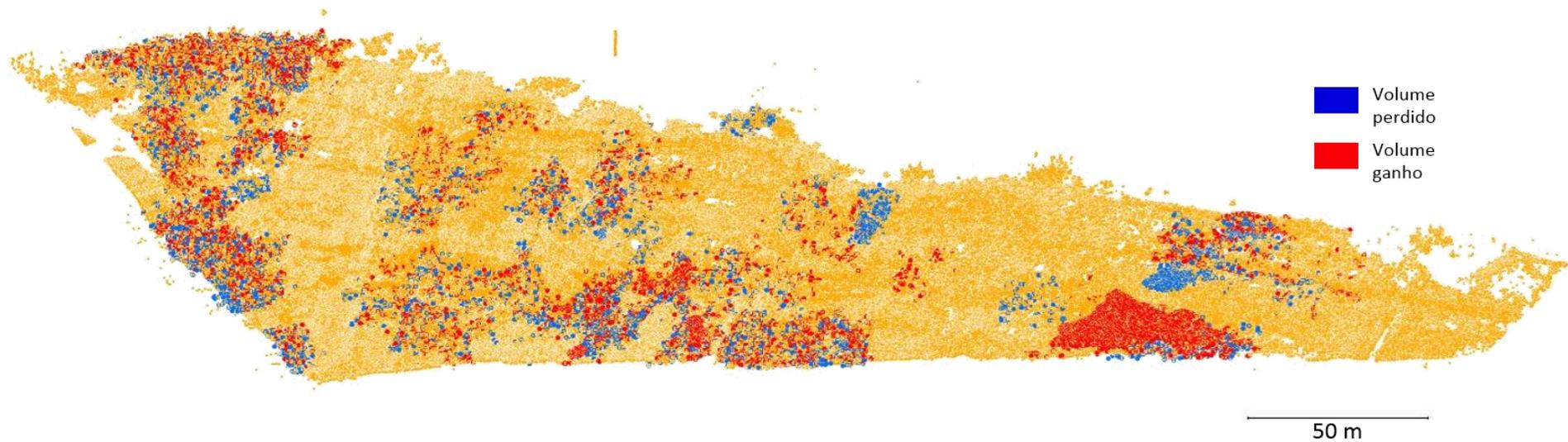


Figura 34 - Cartografia de volumes ganho e perdido na escarpa da praia do Porto da Calada entre Junho de 2012 e Julho de 2013.

Um vez que a grande maioria dos movimentos não apresenta uma forma muito irregular, pode-se assumir que a largura e a altura da α -shape 2D podem ser derivados da área e do perímetro da mesma (Eqs. 4 e 5) (Figura 35):

$$Largura = \frac{4 \times Area}{Perímetro} \quad (4)$$

$$Altura = \frac{Area}{Largura} \quad (5)$$

Os parâmetros área e perímetro são calculados diretamente usando as funções *area* e *perimeter* aplicadas à α -shape 2D.

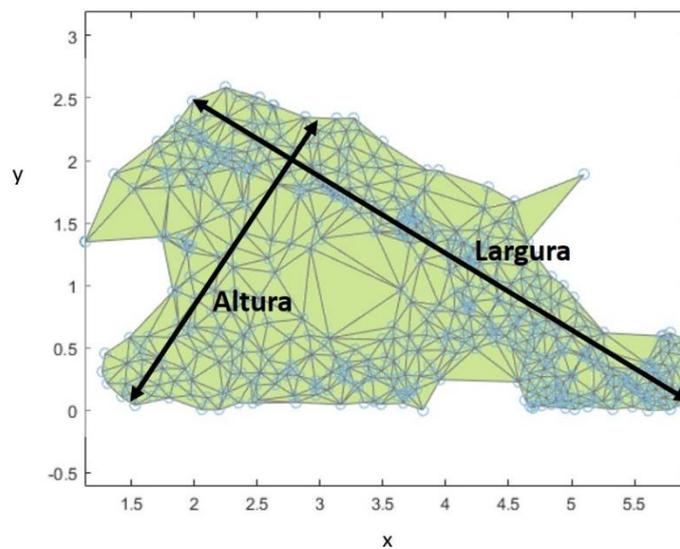


Figura 35 - α -shape 2D criada a partir dos pontos projetados no plano e os parâmetros altura e largura associados.

Esta metodologia de determinação dos parâmetros individuais de um movimento a partir da α -shape 2D do *cluster* que o representa, permite obter valores fiáveis da área plana da forma. A aproximação feita para os cálculos de largura e altura, por serem realizados sobre o plano de melhor ajuste, são melhores descritores da realidade do que a simples medição segundo os planos coordenados XY (largura) e ao longo do eixo Z (altura) na cartografia final.

4.2.2.2 Estimação da precisão do volume de um tetraedro médio

Cada α -shape 3D resulta da tetraedralização dos pontos que compõem o *input* para a sua determinação, sendo que o sólido final é constituído por um conjunto de tetraedros adjacentes.

Para a metodologia modificada de determinação de volumes desenvolvida e apresentada neste trabalho, foi testada uma forma de cálculo da precisão do volume associado a cada α -shape 3D (sólido) pela determinação individual da precisão de cada tetraedro que compõe a forma.

A simulação realizada considera que os pontos originais tridimensionais provêm de uma nuvem de pontos adquirida por *laser scanner* terrestre. Considerando que o volume de um tetraedro (V_t) (Eq. 6) é dado por:

$$V_t = \frac{1}{3!} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

onde cada $x_v, y_v, z_v, v = 1, \dots, 4$ representa as coordenadas tridimensionais dos vértices que o compõem, a precisão do volume de cada tetraedro σ_{V_t} (Eq. 7) depende das variáveis que entram no processo de determinação desse volume, tal que

$$\sigma_{V_t}^2 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial V_t}{\partial u_k} \right)^2 \sigma_k^2 \quad (7)$$

onde u_k representa as variáveis que entram na expressão de V_t e $\left(\frac{\partial V_t}{\partial u_k} \right)$ representa a derivada parcial da mesma expressão em ordem a cada uma das 21 variáveis:

$$V = f(r, el, az, x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, x_{v1}, y_{v1}, z_{v1}, x_{v2}, y_{v2}, z_{v2}, x_{v3}, y_{v3}, z_{v3}, x_{v4}, y_{v4}, z_{v4}).$$

As variáveis descritas são identificadas de seguida.

A precisão das coordenadas x, y, z dos pontos originais 3D medidos pelo *laser scanner* dependem dos parâmetros medidos para cada ponto: *range* (r - distância do equipamento ao ponto medido), *elevation* (el - ângulo medido no plano vertical entre o raio laser e o horizonte) e *azimuth* (az - ângulo azimutal medido no plano horizontal entre o Norte e o plano vertical do raio laser) (Figura 36).

As características do produtor do *laser scanner* Topcon GLS 1500, equipamento usado nos levantamentos, informam que a precisão associada é de 0.004 m a uma distância (r) de 150m e de 6'' para medições angulares (el e az).

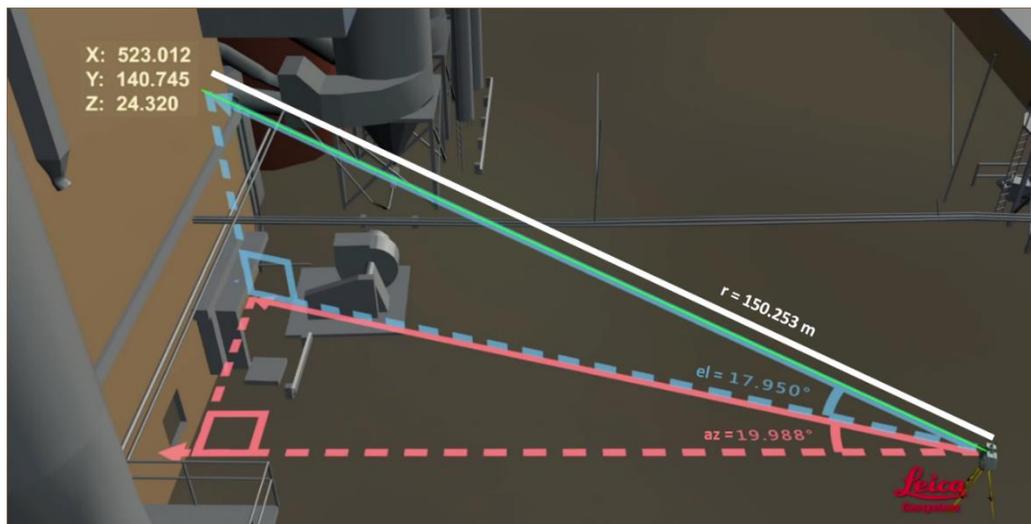


Figura 36 – Representação espacial das componentes distância (r), elevação (el) e azimute (az) num equipamento *laser scanner* terrestre (adaptado de Leica Geosystems).

Uma vez que as coordenadas utilizadas na determinação da α -shape 3D são as coordenadas projetadas no plano de melhor ajuste dos pontos 3D originais, é necessário ainda entrar em consideração com as variáveis usadas na projeção: coordenadas tridimensionais originais do ponto origem das coordenadas planas $P_0 (x_0, y_0, z_0)$ e coordenadas do ponto $P_1 (x_1, y_1, z_1)$, definidas em função dos parâmetros conhecidos r , el e az .

Assim, e utilizando programação simbólica em Matlab, foi possível determinar as expressões das derivadas parciais necessárias ao cálculo da precisão de um volume de um tetraedro t médio, a cujos vértices se atribuíram as seguintes coordenadas métricas (x_v, y_v, z_v) (Figura 37) que correspondem às maiores dimensões, em metros, do envelope paralelepipedico da maior α -shape 3D da nuvem utilizada como exemplo:

$$x_{v1}, y_{v1}, z_{v1} = (0, 0, 0)$$

$$x_{v2}, y_{v2}, z_{v2} = (20, 5, 0)$$

$$x_{v3}, y_{v3}, z_{v3} = (20, 3.5, 1.5)$$

$$x_{v4}, y_{v4}, z_{v4} = (10, 2.5, 1)$$

De acordo com as especificações do equipamento, foi definido que:

$$\partial r = 0.004 \text{ m}$$

e que x , y e z são obtidos em função de r , el e az segundo as fórmulas:

$$x_{01} = r \times \cos(90^\circ - el1) \times \cos(90^\circ - az)$$

$$y_{01} = r \times \cos(90^\circ - el1) \times \sin(90^\circ - az)$$

$$z_{01} = r \times \sin(90^\circ - el1)$$

onde $el1 = 90^\circ - el$, isto é, o ângulo zenital.

Postas estas definições e determinadas as expressões das derivadas parciais, para a simulação do cálculo de precisão do volume (Eqs. 8 a 12):

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \partial r \times \cos(90^\circ - el1) \times \cos(90^\circ - az) \quad (8)$$

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \partial r \times \cos(90^\circ - el1) \times \cos(az) \quad (9)$$

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \partial r \times \sin(90^\circ - el1) \quad (10)$$

$$\frac{\partial x}{\partial el1} = -r \times \cos(90^\circ - az) \times \sin(90^\circ - el1) \times \partial el1 \quad (11)$$

$$\frac{\partial y}{\partial el1} = -r \times \cos(90^\circ - az) \times \sin(az) \times \partial el1 \quad (12)$$

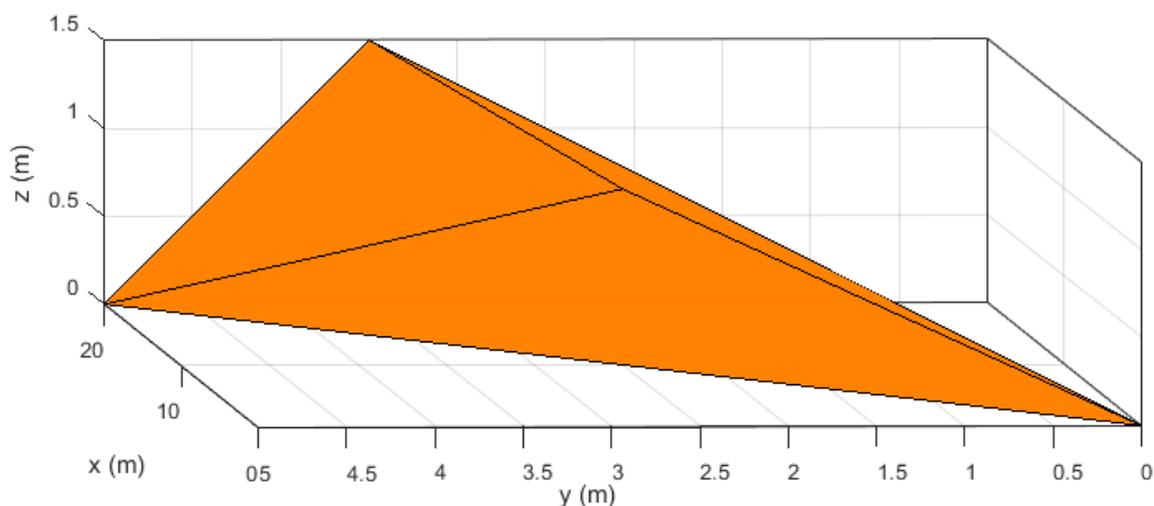


Figura 37 – Tetraedro modelo utilizado para determinar a precisão associada ao cálculo de volumes de um objeto através da α shape.

tomou-se como situação mais desvantajosa a correspondente a um $r = 150\text{ m}$, $el1 = 60^\circ$ e $az = 160^\circ$ e um valor de *distance_uncertainty* (incerteza associada ao cálculo da diferença entre nuvens de pontos, em cada ponto)= 0.1m.

Feita a simulação, obteve-se:

$$\partial_{x_{v1}} = \partial_{x_{v2}} = \partial_{x_{v3}} = \partial_{x_{v4}} = 0.0116\text{ m}$$

$$\partial_{y_{v1}} = \partial_{y_{v2}} = \partial_{y_{v3}} = \partial_{y_{v4}} = 0.0047\text{ m}$$

Tendo em conta que o tetraedro envolve um conjunto de pontos no plano de melhor ajuste à cota 0, e outro conjunto de pontos de iguais coordenadas x,y mas à “cota” M3C2_distance, assumiu-se que:

$$\text{Se } z = 0\text{ m, então } \partial z = 0\text{ m}$$

$$\text{Se } z = \text{M3C2_distance, então } \partial z = \text{distance_uncertainty:}$$

$$\partial_{z_{v1}} = \partial_{z_{v2}} = 0\text{ m}$$

$$\partial_{z_{v3}} = \partial_{z_{v4}} = 0.1000\text{ m}$$

A título de exemplo, apresenta-se a expressão da derivada do volume em função de r para a coordenada x do vértice v_1 (Eqs. 13 a 38).

O tetraedro definido apresenta um volume V_t de 5 m^3 e a incerteza associada a este valor é de 0.5013 m^3 , isto é, cerca de 10% do valor do volume. O volume total de uma α -shape, usada para calcular o volume de uma determinada massa deslocada (perdida ou ganha na face da arriba), terá um valor total calculado pelo

somatório dos volumes dos tetraedros que compõem a α -shape, e a precisão correspondente será cerca de 10% desse valor.

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_{x_{v1}}^2 = \frac{F(P \times I + B1 \times V \times G + V \times U \times H)}{B}$$

$$+ \frac{G \times D \times C}{\left(\left(r9 \sin\left(-\frac{\pi}{2} + el9\right) - L\right)^2 - \left(r9 \cos\left(-\frac{\pi}{2} + az9\right) \times A - K\right) \times E + \left(\left(r9 \times A \times \sin\left(-\frac{\pi}{2} + az9\right) - J\right)^2\right)^2\right) \times 2}$$

$$+ \frac{D \times C}{E \times B \times 2} \quad (13)$$

Onde

$$A = \cos\left(-\frac{\pi}{2} + el9\right) \quad (14) \quad C = (r1 \times P - R) \times I + O \times G + N \times H \quad (16)$$

$$B = I^2 - G \times F + H^2 \quad (15) \quad D = P \times (r1 \times P - R) \times 2 + B1 \times V \times O \times 2 + V \times U \times N \times 2 \quad (17)$$

$$E = \sqrt{\left(\left(r1 \times \sin\left(-\frac{\pi}{2} + el1\right) - L\right)^2 + \left(r1 \times \cos\left(-\frac{\pi}{2} + az1\right) \times M - K\right)^2 + \left(r1 \times M \times \sin\left(-\frac{\pi}{2} + az1\right) - J\right)^2\right)} \quad (18)$$

$$F = \sqrt{(r1 \times p - r)^2 + O^2 + N^2} \quad (19)$$

$$G = r9 \times \cos\left(az9 - \frac{\pi}{2}\right) \times Q - A1 \quad (20)$$

$$H = r9 \times Q \times \sin\left(az9 - \frac{\pi}{2}\right) - T \quad (21)$$

$$I = r9 \times \sin\left(el9 - \frac{\pi}{2}\right) - R \quad (22)$$

$$J = r_{10} \times S \times \sin\left(-\frac{\pi}{2} + az_{10}\right) \quad (23)$$

$$K = r_{10} \times \cos\left(-\frac{\pi}{2} + az_{10}\right) \times S \quad (24)$$

$$L = r_{10} \times \sin\left(-\frac{\pi}{2} + el_{10}\right) \quad (25)$$

$$M = \cos\left(-\frac{\pi}{2} + el_1\right) \quad (26)$$

$$N = r_1 \times V \times U - T \quad (27)$$

$$O = r_1 \times B_1 \times V - A_1 \quad (28)$$

$$P = \sin\left(el_1 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (29)$$

$$Q = \cos\left(el_9 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (30)$$

$$R = r_{10} \times \sin\left(el_{10} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (31)$$

$$S = \cos\left(-\frac{\pi}{2} + el_{10}\right) \quad (32)$$

$$T = r_{10} \times C_1 \times \sin\left(az_{10} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (33)$$

$$U = \sin\left(az_1 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (34)$$

$$V = \cos\left(el_1 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (35)$$

$$A_1 = r_{10} \times \cos\left(az_{10} - \frac{\pi}{2}\right) \times C_1 \quad (36)$$

$$B_1 = \cos\left(az_1 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (37)$$

$$C_1 = \cos\left(el_{10} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (38)$$

(r_1, el_1, az_1) , (r_9, el_9, az_9) e $(r_{10}, el_{10}, az_{10})$ representam as coordenadas polares dos vértices 2, 3 e 4 do tetraedro (pontos 1, 9 e 10 de uma nuvem de pontos).

4.3 Determinação de fatores de predisposição à ocorrência de movimentos em arribas a partir de nuvens de pontos

4.3.1 Declives

Uma forma de determinar os declives, e outras características geométricas das superfícies, é através dos vetores normais dos pontos da nuvem. O vetor normal, ou a normal, de cada ponto é calculada pela estimação de uma superfície local, construída com base nesse ponto e numa vizinhança de n pontos, na qual serão determinadas as 3 componentes normalizadas da normal: N_x , N_y e N_z . No caso dos declives, a sua determinação apenas depende da componente N_z , sendo que $N_z = \arccos(\text{declive})$.

O valor de declive foi calculado para cada ponto da nuvem e verifica-se concordância entre a realidade e os valores calculados (Figura 38, pág. 64).

4.3.2 Exposição

Este fator reflete não só a incidência do sol na face da arriba (

Figura 39, pág. 64), fator relevante nos ciclos de secagem/molhagem das camadas de cotas mais baixas que são afetadas pela água aquando da preia-mar, mas também a atuação mais ou menos direta da agitação marítima. Tomando como exemplo o enquadramento da arriba de Ribeira de Ilhas, estudada e apresentada neste trabalho no Capítulo 6, existe na extremidade norte um promontório de rocha basáltica, classificada como chaminé vulcânica, que confere alguma proteção da agitação marítima à pequena baía que se forma antes de a arriba encurvar para NNW-SSE, direção ao longo da qual se desenvolve. Por este motivo, e tendo em conta a direção W-SW com que os temporais, e conseqüentemente, a mais forte agitação marítima, atacam a costa, a exposição da face da arriba pode constituir um fator relevante na predisposição para a ocorrência de movimentos.

A exposição em cada ponto é função das componentes da normal e é calculada pela equação 39, apresentada na

Figura 39.

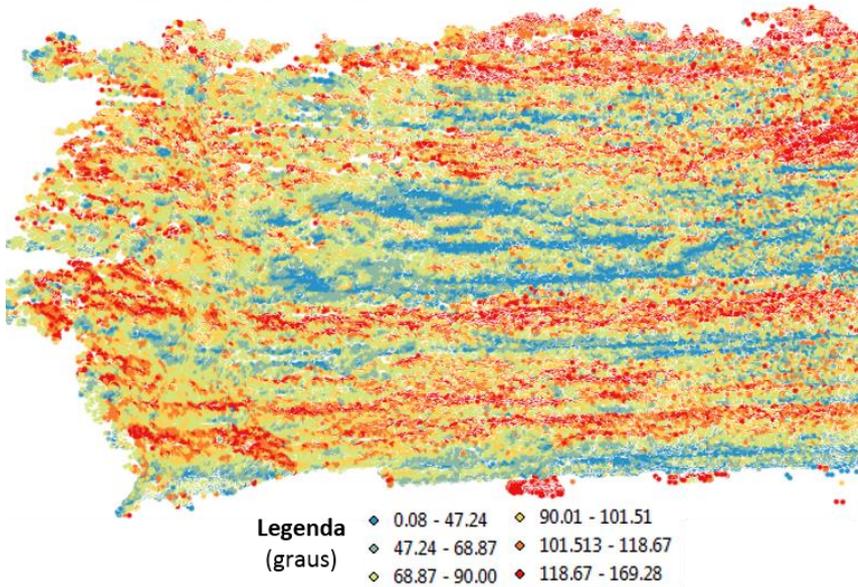


Figura 38 – Em cima: imagem de uma zona côncava da arriba norte de Ribeira de Ilhas; Em baixo: excerto da nuvem de pontos classificada de acordo com os valores de declive.

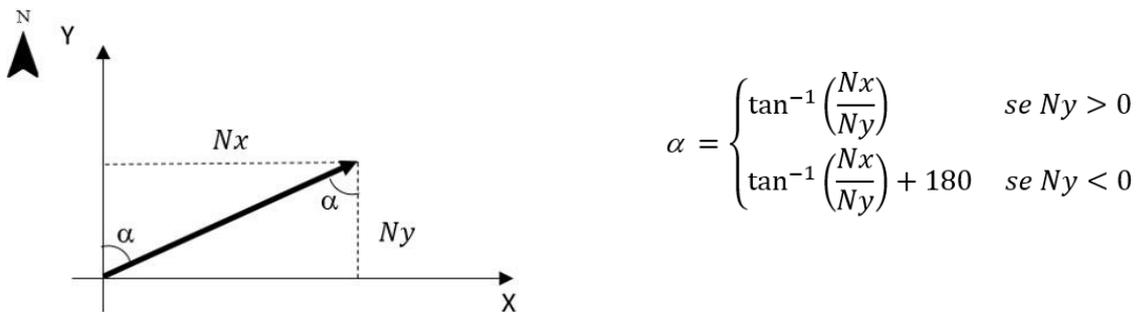


Figura 39 – Determinação do ângulo de exposição através das componentes N_x e N_y da normal e pela função inversa do seno (arcsen).

4.3.3 Resistência dos materiais (distâncias C2M)

Sendo a litologia uma classificação de camadas de materiais de composição semelhante (calcários, margas, basalto, etc.), uma forma indireta de discretizar melhor esta diferença entre materiais é usar a sua resistência aos fenómenos erosivos. Materiais menos resistentes serão desgastados mais rapidamente pelo que se apresentarão mais recuados na face da arriba relativamente a materiais mais resistentes que acabam por ficar mais salientes (Figura 40).

De forma a analisar a variação da saliência e, por conseguinte, a resistência dos diferentes materiais ao longo de toda a face da arriba, foi implementada a seguinte metodologia:

- Decimação da nuvem original obtida por fotogrametria, com resolução espacial de cerca de 3 cm, para resolução de 2.5 m – obtendo-se uma suavização da arriba através da filtragem das altas frequências da nuvem original, em cerca de 10 vezes a resolução original;
- Triangulação da nuvem decimada para criar uma superfície filtrada de altas frequências: esta aproximação funciona como a extensão para 3D do método baseado em perfis 2D transversais da arriba (Figura 40, a castanho) que mostram a variação vertical da superfície, função da diferente resistência dos materiais à erosão (Figura 41);
- Cálculo das distâncias entre a nuvem de pontos de referência e a superfície filtrada, através da aplicação do algoritmo C2M (*Cloud to Mesh*) (CloudCompare).

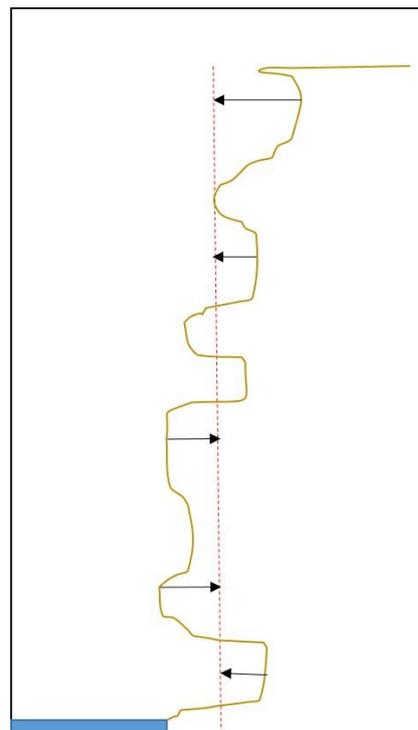


Figura 40 – A distância a um plano médio da arriba (a vermelho, tracejado) por filtragem das irregularidades mais finas (altas frequências) revela a resistência dos materiais à erosão.

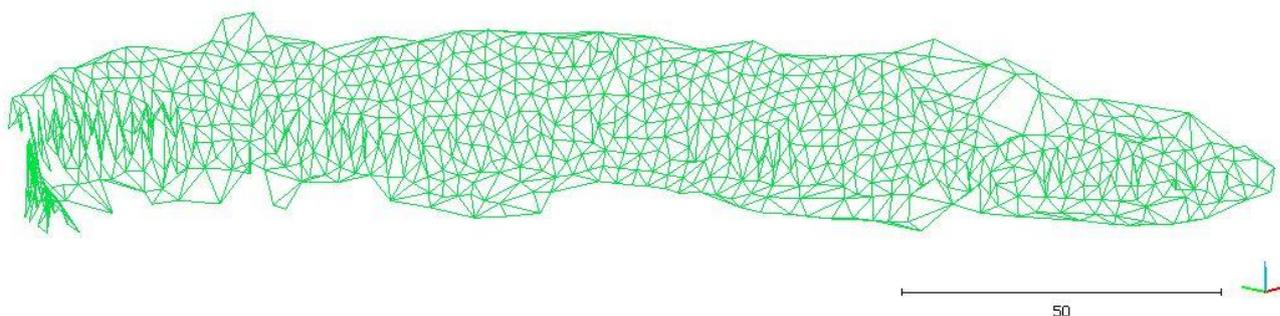


Figura 41 – Superfície filtrada da arriba calculada por triangulação com base numa nuvem de resolução de 2.5m.

A cada ponto da nuvem de referência ficou associada uma distância à superfície: quanto maior a distância positiva à superfície filtrada, mais resistente será o material, ao mesmo tempo que quanto maior a distância negativa à superfície filtrada, menos resistente será o material (Figura 42).

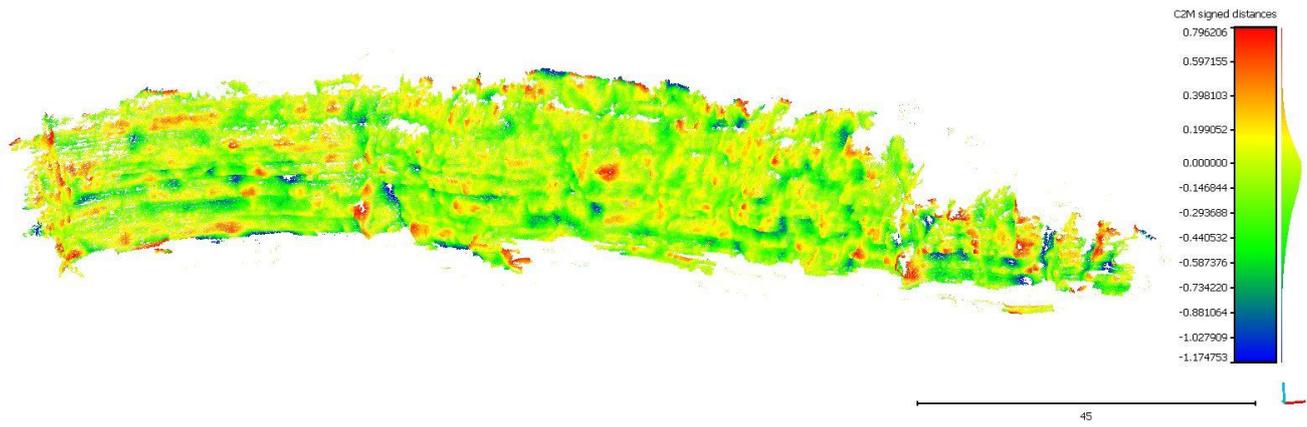


Figura 42 – Nuvem de referência onde a cada ponto está associada a distância à superfície da arriba filtrada de altas frequências.

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

5.1. Monitorização de arribas

5.1.1 Levantamento

Para a avaliação local da face das arribas, as técnicas terrestres permitem a aquisição de dados a partir de uma distância próxima e de uma perspetiva quase normal (aproximadamente perpendicular à arriba).

O levantamento deve ser feito a partir de uma plataforma estável, perto da arriba, tendo por isso que existir um acesso a essa zona. Arribas cuja face é atuada diretamente pela ondulação, como arribas mergulhantes, por exemplo, não podem por isso ser monitorizadas desta forma. Uma alternativa já testada para este tipo de situações é a utilização de um barco (Michoud *et al.*, 2014) ou mesmo uma plataforma aérea tipo parapente (ver Capítulo 5.4) para a obtenção de dados sobre a face das arribas.

A fotogrametria digital terrestre dá origem a produtos 3D com precisão submétrica e resolução espacial elevadas, tais como modelos virtuais em 3D, nuvens de pontos 3D, ortoimagens e mapas verticais. Todos estes produtos representam elementos valiosos para a avaliação temporal e espacial das faces das arribas desde que sejam realizados levantamentos sistemáticos dos objetos de estudo. Assim, informações acerca de zonas de perda e volumes deslocados podem ser determinados.

Uma vez que se assume que alterações na face das arribas têm de facto lugar entre levantamentos consecutivos, é necessária uma referência espacial comum que é estabelecida recorrendo a uma rede de pontos fixos coordenados no local. O estabelecimento de uma rede de pontos fotogramétricos é uma parte fundamental em qualquer projeto fotogramétrico, sendo que a precisão dos produtos finais nunca poderá ser superior àquela dos pontos fotogramétricos em que são baseados (Wolf *et al.*, 2014).

Pela sua importância, o estabelecimento de uma rede de controlo de qualidade pode requerer um investimento significativo pelo que o planeamento prévio é um passo essencial e deve passar pela consideração da precisão requerida e, conseqüentemente, do equipamento a utilizar (Wolf *et al.*, 2014).

O fluxo típico de trabalho fotogramétrico terrestre consiste na aquisição de imagens com uma câmara previamente calibrada com um padrão, fixada num tripé de forma a garantir a qualidade geométrica e nitidez de imagem. A disposição espacial das sucessivas posições de câmara deve garantir a cobertura total da face da arriba ao longo de uma ou várias fiadas por fotografias obtidas com os eixos em orientações paralelas havendo entre cada par sobreposição suficiente para a correlação automática entre imagens e ainda algumas

fotos convergentes para fortalecer a geometria do bloco. Atenção adicional deve ser tida relativamente à relação base/distância, a fim de evitar obstruções provocadas por protuberâncias ou irregularidades nas faces, que é o cenário mais frequente que se encontra nas arribas. Na definição da relação base/distância a implementar em campo, deve ter-se em consideração que é necessário encontrar um compromisso entre a base favorável a uma boa correlação de imagem para a geração de nuvens de pontos 3D mais completas (base curta) e a base favorável à precisão da determinação 3D da posição de cada ponto (base longa).

No caso de levantamentos com *laser scanner*, os principais aspetos a ter em consideração são a georreferenciação e a resolução média da nuvem de pontos a obter. A georreferenciação pode ser realizada por meio de alvos artificiais coordenados no campo, que poderão servir também para o registo das nuvens obtidas nos diferentes “varrimentos”, ou georreferenciar o *laser scanner* e um alvo artificial adicional, em cada estação em que sejam realizados “varrimentos”.

Verifica-se que uma fase de planeamento de levantamento é absolutamente fundamental para a correta fluidez dos trabalhos em campo. Assim, deverá sempre ser cumprido um protocolo, que se compõe de duas partes: planeamento prévio e missão de campo.

O planeamento prévio deverá incluir:

- Visita ao local de forma a avaliar as condições de trabalho e as necessidades associadas à campanha de campo a realizar. Nesta visita prévia, devem já ser obtidas imagens panorâmicas das arribas a estudar por fotogrametria ou *laser scanning* e avançar com um levantamento estereofotográfico expedito para interpretação visual;
- Planeamento, sobre as imagens e com o apoio de um globo virtual (p.ex. Google Earth, ArcGIS Online, Bing Maps), da localização dos pontos fixos (com coordenadas a determinar num sistema de referência global) e planeamento da localização dos pontos fotogramétricos. Caso o perfil de desenvolvimento da arriba seja muito irregular, aconselha-se, previamente ao levantamento fotogramétrico e em gabinete, a definição das fiadas de tomadas de foto, com direções paralelas aos vários segmentos;
- Definição da quantidade de varrimentos com *laser scanner* necessários e respetivas posições de estacionamento do *laser scanner*, tendo em atenção evitar grandes ângulos de incidência do *laser* nas faces da arriba;
- Verificação das condições de acesso à base da arriba e estacionamento dos equipamentos necessários a esta tarefa;
- Definição do dia em que o levantamento deve ser realizado: verificação das condições marítimas (hora e altura da baixa-mar, se necessário), orientação da arriba (verificar incidência dos raios solares) e previsões das condições meteorológicas e de rebentação.
- Imediatamente antes ou depois do levantamento, em gabinete, a calibração da câmara fotográfica, tal como vai ser (ou foi) utilizada para o levantamento fotogramétrico;

A missão de campo inclui as seguintes tarefas:

- Coordenação dos pontos fixos e fotogramétricos;
- Levantamento fotogramétrico para modelação 3D, com tripé, e seguindo alinhamentos pré-definidos das fiadas de tomada de foto;
- Levantamento com *laser scanner* para modelação 3D de alta definição.

(não é obrigatório que sejam realizados os dois tipos de levantamento).

Verificou-se ser fundamental que o trabalho de coordenação topográfica de pontos fotogramétricos fosse realizado com uma estação total sem alvos refletores (*reflectorless total station*). O conjunto tradicional de estação total e alvos refletores, embora cumprindo a tarefa de coordenação de pontos com precisão, requer condições que, em ambiente de praia ou arriba, dificilmente se verificam. Nesta variante, os alvos seriam acoplados a bastões específicos e posicionados no topo e base da arriba numa distribuição homogénea ao longo do desenvolvimento da arriba e então coordenados. Para georreferenciação das imagens é necessário não só registar as coordenadas XYZ destes alvos, mas é também fundamental que se mantenham na mesma posição durante todo o levantamento fotográfico e que sejam visíveis em pelo menos três imagens consecutivas.

São de salientar alguns problemas associados a esta estratégia: o ambiente ventoso no topo da arriba causa o balanço dos alvos refletores alterando a sua posição ao longo do levantamento; as dificuldades e insegurança associadas à aproximação à crista das arribas, tanto para técnicos como para o equipamento, não permitem de todo a colocação de alvos refletores ou, ainda que permitindo, a sua visibilidade a partir da câmara estacionada na zona do areal ou base da arriba, é muito diminuta ou mesmo inexistente. Para sectores de arriba longos, é impraticável aplicar esta metodologia dada a enorme quantidade de alvos refletores, bastões e tripés necessários à correta execução do trabalho.

A utilização de uma estação total *reflectorless* permite uma muito maior flexibilidade na escolha e medição dos pontos a coordenar: qualquer ponto natural conspícuo numa superfície capaz de refletir o raio laser que é emitido pela estação pode considerar-se um ponto fotogramétrico a utilizar na georreferenciação, desde que este seja visível nas imagens. É pois necessária, como referido, a execução de uma fase de observação sistemática das imagens panorâmicas e/ou estereoscópicas realizadas numa primeira visita ao local, de forma a definir quais os pontos de interesse a coordenar no terreno. A possibilidade de coordenar qualquer ponto de interesse permite ainda ter maior redundância na informação topográfica disponível.

Foram coordenados pontos fotogramétricos nas faces das arribas e pontos fixos nas vias de acesso à praia, pequenos afloramentos ou outras instalações de praia. Os pontos nas faces da arriba não estão assinalados fisicamente, mas a documentação completa da sua localização, incluindo registo fotográfico, é compilada para uso em todas as épocas de observação. Uma quantidade redundante de pontos fotogramétricos é executada durante a primeira época, a fim de diminuir a necessidade de realizar nova campanha de coordenação por perda de informação devido a movimentos de terras e blocos em novas épocas de observação.

Relativamente aos equipamentos utilizados, os dados de GPS usados no campo foram obtidos através de um recetor Leica Viva NetRover (GS08 GNSS Receiver e CS10 3.5G Field Controller) usando posicionamento RTK com base na rede RENEP (RENEP, 2014). A coordenação de pontos foi feita com recurso a uma estação total *reflectorless* Leica TS-02, apoiada por GPS. A precisão da estação total é de 2mm + 2 ppm para distâncias até 500 m e 3" para os ângulos, originando, no pior cenário (a maior distância medida e o menor ângulo zenital), uma precisão de ± 0.053 m 3D.

Os conjuntos de fotografias adquiridos foram processados em *software* PhotoModeler Scanner 2013 (Eos Systems Inc.), utilizando o operador de *SmartMatch* (deteção automática de pontos homólogos em várias fotografias) sempre que possível, a fim de acelerar o processo de orientação. Este recurso automático é muito útil, considerando a grande quantidade de imagens envolvida no processo.

No caso de levantamentos com *laser scanner*, foram usados os programas Realworks da Trimble e *software* proprietário da Topcon para processamento das nuvens de pontos geradas.

5.1.2 Comparação *laser scanning* vs. fotogrametria terrestre

O *laser scanning* e a fotogrametria terrestre são atualmente métodos imprescindíveis para a determinação da geometria de uma superfície irregular e de grandes dimensões, pela sua fiabilidade, desde que garantidas as corretas condições de operacionalidade. Quando associados, os dados do *laser scanner* e a radiometria das imagens provenientes de um levantamento fotogramétrico com uma câmara de alta resolução vêem as suas potencialidades exponenciadas e podem ser obtidos modelos geológicos digitais virtuais (Kolecka, 2011; Buckley *et al.*, 2008, 2009) de um afloramento, escarpa, etc., onde a observação e medições rigorosas podem ser executadas, sem que se coloque em risco pessoas e bens.

Assim, o melhor produto da conjugação dos métodos *laser scanning* e fotogrametria terrestre é a união da informação geométrica e semântica visível disponível para interpretação geológica.

Com o objetivo de comparar o levantamento fotogramétrico terrestre e o levantamento com *laser scanner*, tanto na fase operacional como nos resultados, foram realizados simultaneamente os dois tipos de levantamento na praia da Bafureira, em situação de baixa-mar, em Março de 2012. Em posse de dois levantamentos, pode analisar-se as diferenças entre eles.

Os levantamentos iniciaram-se ao mesmo tempo e tiveram uma duração equivalente de cerca de 2h, cobrindo todo o segmento de arriba. Foram obtidas 36 imagens, usando bases de 7 m, a uma distância de 10 m à face da arriba. As imagens permitiram gerar uma nuvem de pontos 3D com um total de 26 milhões de pontos XYZ com radiometria associada (FT). No que respeita o levantamento com *laser scanner*, foram necessárias 3 estações, que deram origem a 3 nuvens, resultando numa nuvem de pontos 3D total (TLS) de 16 milhões de pontos XYZ sem radiometria associada. Para a georreferenciação de ambos os levantamentos, foram usados 6 alvos Leica em disco para *laser scanner* e alvos refletos, coordenados com GPS.

O levantamento fotográfico exige a permanente interação do operador que vai adquirindo as imagens ao longo da arriba, deslocando-se ao longo da base. No caso do *laser scanner*, em cada estação, o operador define a área a ser varrida e aguarda que o procedimento decorra e termine, sem intervenção.

Relativamente às necessidades de operação de cada equipamento, o *laser scanner* exige muito mais energia do que a câmara fotográfica, o que deve ser considerado na fase de planeamento, sobretudo quando se trata de levantamentos extensos.

Uma vez obtidas as imagens e terminado o varrimento com *laser scanner*, inicia-se o processamento em gabinete. Enquanto que num levantamento com *laser scanner* as nuvens de pontos vão sendo geradas ao longo do varrimento, as imagens obtidas no levantamento fotogramétrico têm ainda de ser processadas fotogrametricamente (orientação relativa e georreferenciação) antes da geração das nuvens de pontos. As nuvens de pontos do *laser scanner* têm de ser registadas e georreferenciadas em gabinete, sendo este processo, no entanto, mais rápido que o fotogramétrico. Neste último, é necessário medir os pontos fotogramétricos, em todas as imagens em que sejam visíveis, sendo que no processamento das nuvens de *laser scanner* os alvos são normalmente detetados automaticamente e georreferenciados.

Relativamente a resultados, o cálculo das diferenças, realizado no *software* CloudCompare (2015), por meio do algoritmo M3C2 (Lague *et al.*, 2013), entre a nuvem de pontos TLS e a nuvem de pontos FT permitiu verificar que o objeto é muito semelhante quando gerado por varrimento com *laser scanner* ou por processamento

fotogramétrico terrestre com geração de nuvens de pontos por correlação automática de imagem. As diferenças absolutas que se observam, e que se concentram nos 0.3 m (a verde, na Figura 43), resultam da propagação dos erros e imprecisões de ambas as técnicas, desde os erros associados aos equipamentos, ao processo de registo das nuvens e georreferenciação, à correlação de imagens, e por fim, o erro associado ao próprio algoritmo M3C2 que depende de uma série de parâmetros que também influenciam os resultados.

No entanto, ao observar a distribuição das diferenças ao longo da nuvem, é possível encontrar alguma relação entre o posicionamento do *laser scanner* e os valores das diferenças: nas zonas onde o varrimento se aproximava da perpendicularidade e a distâncias mais curtas, relativamente à face da arriba, as diferenças entre as duas nuvens diminuem (ver Figura 43), aumentando depois com a maior obliquidade e distância dos feixes laser que são refletidos pelas faces da arriba.

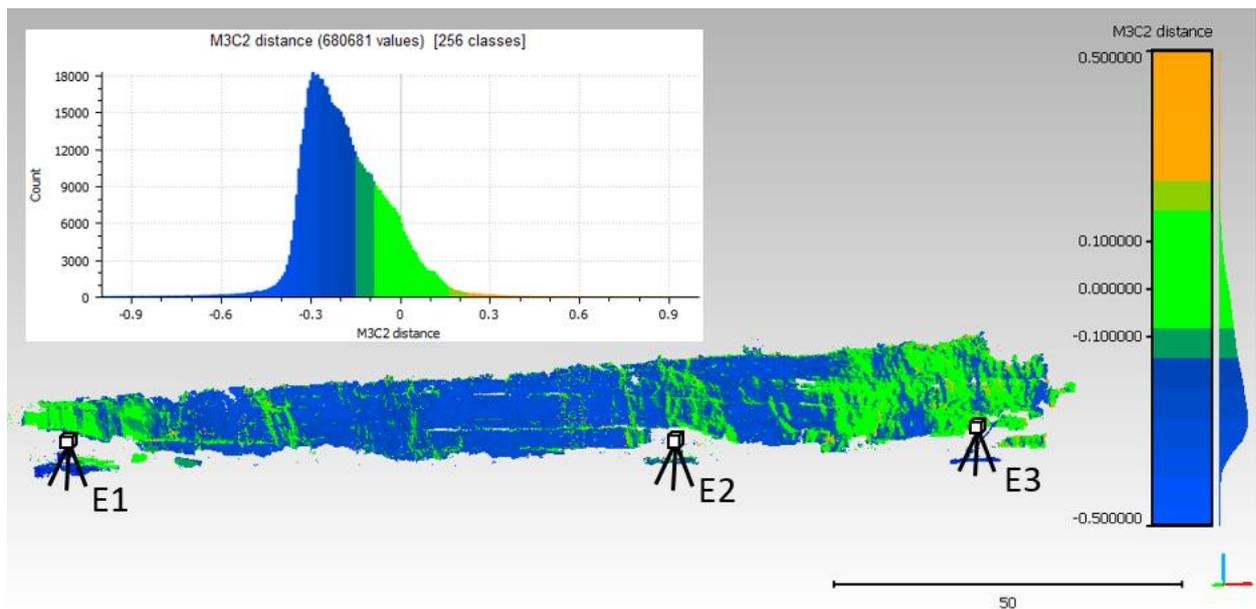


Figura 43 – Comparação entre nuvem de TLS e nuvem de FT com localização das estações de varrimento E1, E2 e E3, que distavam cerca de 47m, 36m e 38m à arriba, respetivamente.

Assumindo que a georreferenciação está correta e que é comum aos dois levantamentos, conclui-se que o número de estações de varrimento deverá garantir não só a cobertura total (ausência de lacunas e zonas de sombra) como ângulos de incidência dos raios *laser* menores assim como menor distância relativamente ao objeto de interesse. Quanto mais irregular for o desenvolvimento direcional da arriba, maior o número de estações necessário. Esta conclusão está de acordo com Soudarissanane *et al.* (2007, 2011), que verificou existir influência da geometria de aquisição de dados com *laser scanner* numa superfície na qualidade da nuvem de pontos resultante: existe uma diminuição da qualidade da medição 3D dos pontos com o aumento do ângulo de incidência do laser, bem como com o aumento da distância do equipamento ao objeto, devido ao elevado nível de ruído. Também Lichti (2007) e Pesci (2008) suportam estas afirmações, sugerindo mesmo varrimentos com um ângulo de incidência não superior a 65° sob pena de pontos obtidos a partir deste limite não serem passíveis de utilização; no entanto, Pesci (2008), menos crítico, refere que superfícies rugosas poderão amenizar ligeiramente este efeito por permitirem pontualmente uma incidência mais perpendicular.

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

Ainda com o objetivo de comparar técnicas, foi realizado um exercício de fusão de dados provenientes do varrimento com *laser scanner* e do levantamento fotogramétrico.

Uma vez que o *laser scanner* Leica C10 não tem câmara fotográfica incorporada nem nenhuma câmara foi instalada no momento do varrimento, não se possui dados RGB para associar à nuvem de pontos. No entanto, como em simultâneo se realizou um levantamento fotográfico para efeitos de processamento fotogramétrico, realizou-se o exercício de atribuição dos dados RGB das imagens à nuvem de pontos XYZ. Foi então seguido o seguinte procedimento: remoção de ruído, como zonas não pertencentes à arriba (areia, pontão, parte de um edifício), manchas de vegetação densa, objetos artificiais no topo da arriba (vedação e postes); criação da superfície através da seleção do método de projeção que melhor se aplica a superfícies complexas (que se afastam de planos ou curvaturas mais regulares); edição da superfície criada: em zonas de vegetação foi aplicada alguma suavização de forma a remover picos e faces mal trianguladas, e ainda a homogeneização das normais das faces trianguladas.

É importante salientar nesta altura que a grande densidade de pontos pode ser prejudicial aquando da triangulação da nuvem de pontos: a tentativa de ligar pontos que, na realidade, não deveriam ser ligados resulta em faces invertidas, isto é, faces cuja normal está direcionada para “dentro” da arriba. Embora em termos de visualização esta situação não constitua um problema, é dificuldade na fase de texturização da superfície, uma vez que a informação radiométrica fica atribuída à “frente” da face, que estará invertida.

Para a texturização foram então usadas as imagens provenientes do levantamento fotogramétrico pelo que foi necessário corrigir previamente as imagens das distorções da objetiva, procedimento realizado em *software* fotogramétrico após calibração da máquina fotográfica para modelar tais distorções. O processo de texturização segue os seguintes passos: correspondência das imagens e atribuição de textura à nuvem. A opção de *match* ou correspondência de imagens determina a posição da câmara no momento de obtenção da imagem, isto é, calcula a orientação externa da imagem. Esta operação assenta na medição de um mínimo de 4 pares de pontos (ou segmentos) comuns entre a imagem e o modelo.

Apesar de o *software* apenas permitir pré-visualização e edição após a marcação de 4 pares de pontos, verificou-se que, na prática, para elementos tão irregulares como a face de uma arriba, deverão ser medidos para cada imagem vários pares de pontos unívocos, com muito rigor, bem distribuídos pela imagem. Recuperadas as orientações das imagens, estas são projetadas pixel a pixel sobre a superfície criada por meio de algoritmos de ortorretificação de imagem (Figura 44).

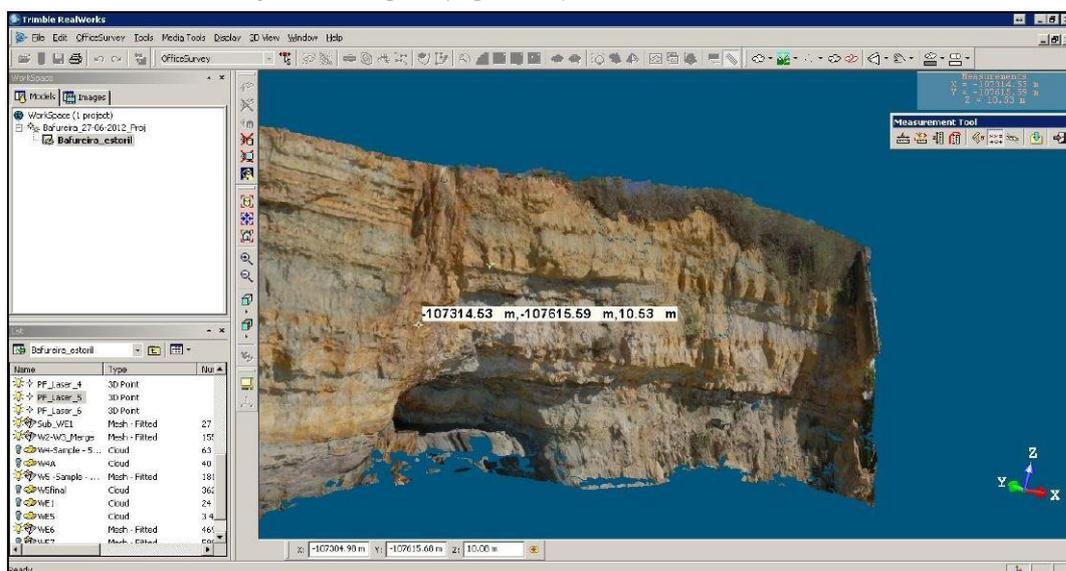


Figura 44 - Superfície 3D modelada a partir da nuvem de pontos e texturizada a partir das fotografias obtidas para processamento fotogramétrico: esta informação é 3D pois cada pixel tem as 3 coordenadas.

Deste exercício é possível retirar algumas conclusões relevantes:

- Como referido anteriormente neste trabalho, a passagem da nuvem de pontos 3D para uma superfície por interpolação diminui o grau de descrição real da face da arriba, adicionando ainda o facto de terem de ser utilizadas outras ferramentas de remoção de ruído e suavização;
- A utilização de imagens obtidas sem correlação com o *laser scanner* obriga à correção prévia das distorções radiais e tangenciais associadas à câmara, num procedimento totalmente distinto do processamento da nuvem de pontos;
- A necessidade de obter pontos homólogos entre a nuvem e as imagens verifica-se ser uma tarefa morosa e trabalhosa: trata-se de uma nuvem de pontos, sem cor, representativa de um objeto complexo, sem características geométricas bem definidas como arestas ou saliências regulares, isto é, sem elementos conspícuos que se possam correlacionar inequivocamente com o que está representado nas imagens.

5.1.3 Deteção de alterações entre épocas de observação

A tarefa da monitorização tem como pressuposto mais do que uma época de observação: é estabelecida uma situação de referência, a determinada data, e posteriormente são executadas novas épocas de observação de forma a verificar se existiram alterações. No caso da monitorização de arribas, o objetivo é detetar, de uma época para a seguinte, que alterações se verificaram e, dentro dessas alterações, as que se deveram a movimentos de massa na face da arriba.

Das 10 praias que foram alvo de monitorização, foram escolhidas três para demonstrar a aplicação das diferentes técnicas de monitorização e os procedimentos desenvolvidos para obter diferentes produtos e resultados a partir delas. Assim, apresenta-se o fluxo de trabalho descrito em 5.1.1 em três praias: Bafureira, Porto da Calada e São Bernardino (ver Figura 2, Capítulo 1). Tanto na praia da Bafureira como na praia do Porto da Calada foram realizados levantamentos por *laser scanning* e fotogrametria terrestre; na praia de São Bernardino apenas se realizaram levantamentos fotogramétricos terrestres.

A praia da Bafureira foi escolhida por se tratar de um segmento muito utilizado para fins balneares ao longo de todo o ano e por se saber, por dados publicados (Marques, 2006; 2013) e por registo dos movimentos por parte da APA, I.P., , tratar-se de um sector de evolução rápida em termos de perda de material por movimentos de vertente. Por um lado, haveria a certeza de se conseguir registar alterações significativas através do seguimento de um plano de monitorização local por um período de alguns anos; por outro lado, a proximidade geográfica à Universidade de Lisboa facilitaria esta tarefa e, especialmente, a deslocação ao local no caso de ocorrência de eventos inter-épocas de observação pré definidas. Esta foi também a única praia a ser monitorizada simultaneamente por fotogrametria terrestre e por *laser scanning*, permitindo a comparação das duas técnicas.

A praia do Porto da Calada sofreu intervenções profundas em todos os sectores onde se iniciou a monitorização. As arribas foram saneadas em muitos locais e foram colocadas redes tensionadas para retenção de blocos caídos. Também as zonas adjacentes às arribas foram intervencionadas no que respeita a canais de escoamento de águas e valas e muros de retenção de blocos. Com as intervenções realizadas, a praia

do Porto da Calada não poderá servir futuramente como caso de estudo para monitorização do fenómeno erosivo natural das arribas mas o acompanhamento das alterações que certamente continuarão a ocorrer poderá beneficiar dos resultados obtidos pré-intervenção. Também nesta praia se encontrou o cenário mais desafiante para levantamentos integrais de arribas: uma configuração morfológica muito côncava, alturas médias muito elevadas, na ordem dos 80 m, declives muito elevados, depósitos de sopé volumosos e ausência de sinal GSM para a correta operação do GPS em modo RTK.

A praia de São Bernardino possibilitou a verificação da aplicabilidade das técnicas em estudo para modelação de blocos individuais e cálculo dos respetivos volumes, pela deposição de blocos rochosos de grandes dimensões que ocorreram por duas vezes no talude de acesso ao areal, zona de trânsito de pessoas e bens na época balnear.

Finalmente, as três praias analisadas diferem muito no que se refere aos materiais e estruturas geológicas, alturas e comprimentos dos sectores monitorizados e características das instabilidades.

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos na deteção de alterações entre épocas de observação para os três locais. Foi usado o programa CloudCompare (2015) para detetar as alterações com o algoritmo M3C2 (Lague *et al.*, 2013) e, seguidamente, a separação dos dados correspondentes a alterações positivas e negativas, isto é, ganhos e perdas de material, bem como o cálculo dos volumes correspondentes, foram realizados no programa VOLTERRE.

5.1.3.1 Praia da Bafureira

Este trabalho incidiu sobre o segmento de arribas verticais que estão visíveis desde o final da praia de São Pedro até à praia da Bafureira, local onde são interrompidas por um edifício com funções de restaurante que ocupa a fachada em toda a sua extensão vertical. Apesar da estreita faixa de areia muito preenchida por blocos rochosos, que se observa apenas em baixa-mar, esta zona é recorrentemente frequentada por banhistas que aproveitam os blocos de grandes dimensões para se estabelecerem por períodos mais alargados no tempo (Figura 45).



Figura 45 – Ocupação dos blocos rochosos na base da arriba para uso balnear.

A praia da Bafureira integra-se num sistema de duas praias que consiste na praia de S. Pedro do Estoril e na praia da Bafureira, sendo esta última uma pequena área de areal no extremo oeste. Todo o litoral desta região é caracterizado por segmentos de arriba rochosa de altura variável, onde se vão encontrando pequenos sectores de acumulação de areal que constituem zonas preferenciais de uso balnear, ocupadas praticamente todo o ano, especialmente de forma muito densa na época balnear.

As arribas deste segmento, que apresentam alturas variando entre cerca de 7m e 21m, com valores mais frequentes compreendidos entre 11m e 17m, são caracterizadas por uma sucessão de camadas de arenitos com delgadas intercalações de argilas, margas e calcários pertencentes à designada Formação do Rodízio, atribuída ao Apciano-Albiano. A existência de níveis mais resistentes (calcários e arenitos) e de baixa resistência (margas e argilas), leva a que a sua evolução geomorfológica se processe por erosão diferencial levando à geração de camadas mais salientes sem suporte, em consola.

Está cartografado um filão de rocha basáltica e quatro falhas, que cortam as camadas sedimentares.

Nas zonas mais frequentadas existem já algumas estruturas de contenção de forma a minimizar o impacte que quedas de blocos possam ter em pessoas e bens. No caso mais a este, junto ao restaurante, a frequência de instabilidades junto ao edificado já obrigou a algumas intervenções de engenharia de forma a proteger a estrutura (Figura 46).

Do ponto de vista dos movimentos de vertente, estudados pelos métodos simplificados de Marques (2006), e utilizando fotografias aéreas de diferentes datas entre o período de 1938 a 2008, neste segmento entre as praias de São Pedro e Bafureira foram detetadas 21 instabilidades que afetaram a crista da arriba. No total, estes movimentos provocaram recuos no topo da arriba de até 7 m, com uma área perdida de até 150 m² e numa extensão máxima afetada de 62 m (Marques *et al.*, 2013).

Na Praia da Bafureira foram realizados dois levantamentos por *laser scanning*, em Março de 2012 e Abril de 2014, que contaram com o apoio de investigadores da Universidade da Extremadura (Espanha) que cederam o equipamento Leica C10 e executaram os levantamentos, de acordo com o planeamento prévio (Figura 47).

Os levantamentos foram executados em cerca de 2 a 2.5 horas totais de trabalho de campo. Os alvos em disco foram sucessivamente sendo colocados em posições visíveis simultaneamente de duas estações do *laser scanner*.

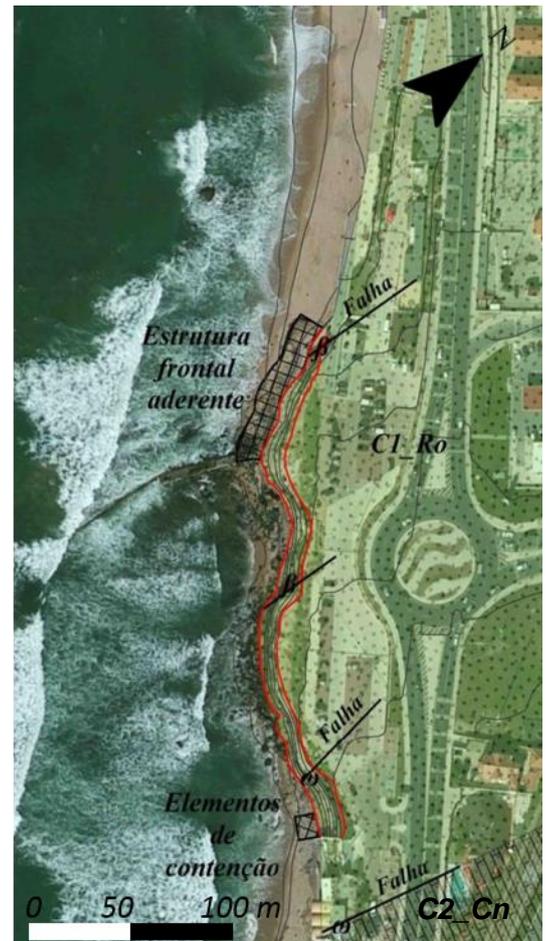


Figura 46 - Enquadramento geológico e morfológico das arribas da praia da Bafureira: β - filão de rocha basáltica, C1Ro - Formação de Rodízio (pelitos, arenitos e conglomerados), C2Cn – Formação de Caneças (rochas calcárias e areníticas); polígono a vermelho delimita a zona da face das arribas.

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

No que respeita a tarefa de monitorização das arribas em estudo, foram realizadas 4 épocas de observação com levantamento fotogramétrico, em duas das quais se realizaram simultaneamente levantamentos com *laser scanner*.

No que respeita os levantamentos com *laser scanner*, foi feita a comparação das duas épocas de observação por determinação das diferenças entre Março de 2012 (TLS0) e Abril de 2014 (TLS2). Os dados provenientes dos varrimentos com *laser scanner* são apresentados na Tabela 5.



Figura 47 - Plano esquemático do posicionamento do laser scanner para varrimento da Praia da Bafureira.

Tabela 5 – Características dos levantamentos com laser scanner na Praia da Bafureira

Época	Data	Georreferenciação	Nuvens de pontos	
			Num. (milhões)	Espaço (Gb)
Época 0 (TLS0)	27/03/2012	5 alvos Leica	≈ 16	≈ 0.75
Época 1	02/04/2013	-	-	-
Época 2 (TLS2)	07/04/2014	Alvos Leica (+PFs naturais)	≈ 17	≈ 0.7
Época 3	23/10/2014	-	-	-

Ao calcular as diferenças entre as duas nuvens utilizando o algoritmo M3C2, verificou-se haver um desvio significativo das duas nuvens na zona do restaurante que se situa no extremo este da praia, edifício que não sofreu alterações entre as duas datas e que, portanto, não deveria apresentar qualquer alteração que não se considerasse desprezável tendo em conta a imprecisão associada à georreferenciação e registo das nuvens. Usando um cálculo simples nuvem a nuvem (C2C) as diferenças calculadas mostraram uma variação até cerca de 2.5 m nesta zona (

Figura 48), indicando problemas sérios numa época ou em ambas.

Foi realizada uma campanha de campo para verificação da qualidade da georreferenciação em cada época, coordenando no local um total de 28 pontos fotogramétricos, utilizando como referências esquinas, cruzamentos de vigas, ombreiras de porta, etc., de forma a garantir a melhor precisão possível na medição das coordenadas e, posteriormente, na medição manual desses pontos nas nuvens.

A comparação entre as coordenadas calculadas em campo e aquelas registadas por medição manual em cada nuvem, 2012 e 2014, vieram confirmar que seria esta última nuvem a responsável pelo desfasamento: as médias das diferenças nas componentes x, y e z para a nuvem de 2012 e para a de 2014 relativamente às coordenadas de campo, retribuíram os valores de, respetivamente, 0.04 m, -0.02 m e 0.09 m, e -1.94 m e 0.16 m.

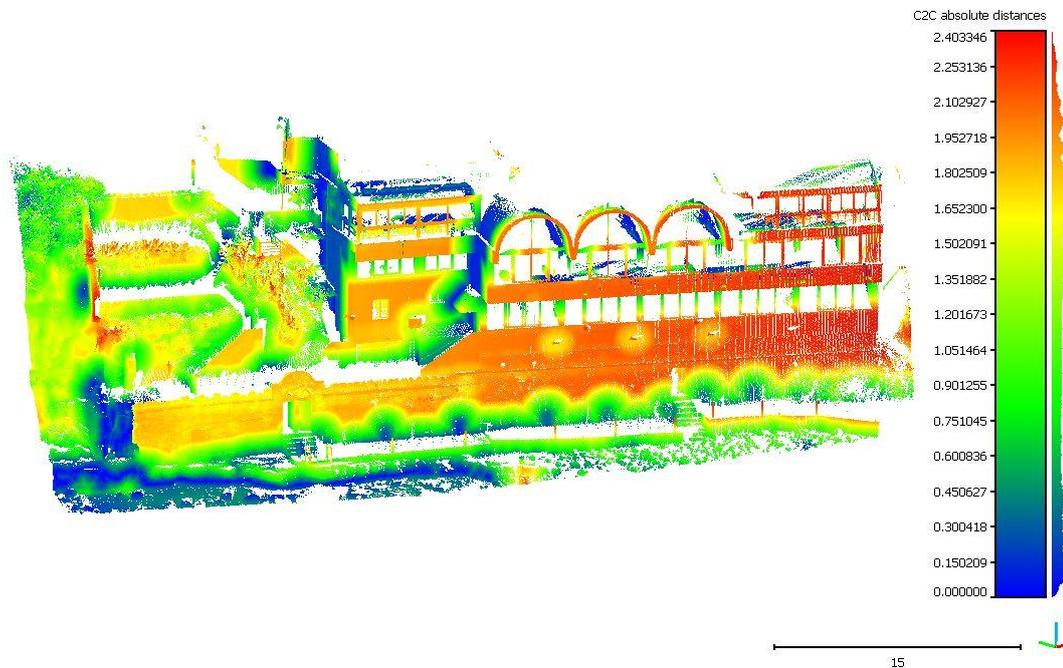


Figura 48 – Desvios entre as duas nuvens de pontos obtidas com laser scanner em 2012 e 2014, calculadas com o algoritmo C2C.

Após a deteção desta situação, as duas nuvens foram analisadas em pormenor, e verificou-se que este desfasamento relativamente à nuvem de 2012 está presente em toda a nuvem de 2014, apenas se refletindo de forma tão expressiva nesta zona devido à existência de elementos muito geométricos não passíveis de terem sofrido as alterações registadas e onde foi evidente a falta de coerência entre os dois levantamentos.

Tratando-se do mesmo objeto, existe a possibilidade de registar a nuvem desfasada (2014) relativamente à nuvem correta (2012) com base em pontos comuns ainda sabendo que ocorreram movimentos de vertente na face da arriba. O registo consiste, no programa CloudCompare, na aplicação de uma matriz de transformação homogénea a toda a nuvem a registar. Esta matriz consiste em rotações, translações, perspetiva e fator de escala e é calculada com base nas diferenças entre uma amostra de pontos de uma e outra nuvem. Tendo em conta a elevada densidade das nuvens de pontos de ambas as épocas – cerca de 3 milhões de pontos – definiu-se uma amostra aleatória de 200 mil pontos para o cálculo da matriz de transformação e aplicou-se essa transformação à nuvem de 2014. Dada a densidade da nuvem original e a quantidade de pontos que podem ter sofrido alterações causadas por movimentos de vertente, que se sabe ser muito inferior, pode-se assumir que a probabilidade de nessa amostra constarem pontos que sofreram de facto alterações é reduzida, sendo então possível um registo da nuvem desfasada à nuvem correta.

A aplicação da matriz de transformação devolveu um RMS do processo de 0.34 m. Verifica-se a correta correspondência na zona do edifício do restaurante que se sabe não ter sofrido quaisquer alterações e cujas diferenças, após registo, se concentram em torno do zero até valores inferiores ao RMS (Figura 49).

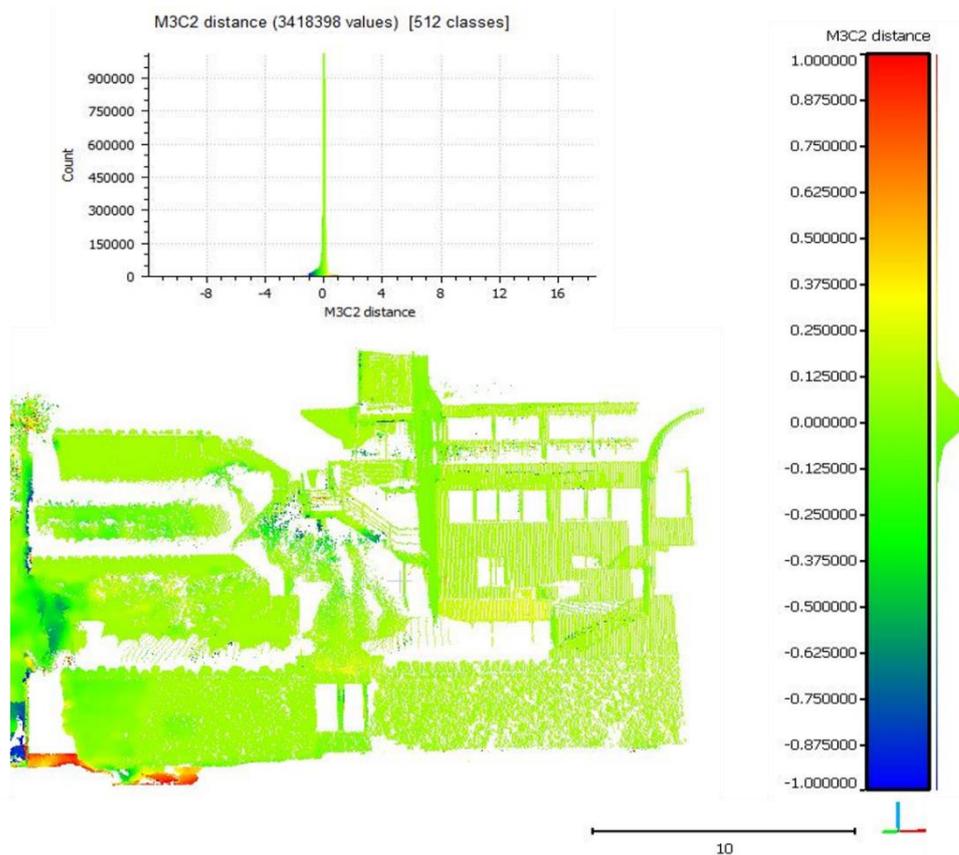


Figura 49 – Diferenças entre a época TLS0 e época TLS2, após registo da nuvem TLS2 sobre a TLS 0 com base numa amostra de 200 mil pontos.

➤ Resultados da evolução das arribas entre Março de 2012 e Outubro de 2014

Foi possível então realizar o cálculo das diferenças entre as duas épocas de levantamento com *laser scanner* (Figura 50) e a posterior determinação de volumes deslocados, para todo o setor, revelou zonas de perda de material num total de $286.37 \pm 28.6 \text{ m}^3$ entre as duas épocas de levantamento: de 27/03/2012 a 07/04/2014 (Figura 51). Este valor foi obtido somando os volumes dos *clusters* que representam perdas reais de material, excluindo, portanto, as diferenças relativas a zonas de vegetação, por exemplo. A título de exemplo, verifica-se haver concordância entre as manchas de alteração de uma época de observação para outra pela análise comparativa das imagens fotográficas obtidas no terreno, neste caso, a queda de um bloco de grandes dimensões (Figura 53).

Na Figura 50 verifica-se zonas onde o algoritmo M3C2 detetou diferenças negativas, isto é, zonas de perda de material, mas que não estão identificadas como tal na Figura 52. Da observação da Figura 51 verifica-se que se trata de zonas identificadas pelo algoritmo M3C2 como zonas não significativas e, portanto, não contabilizadas para a definição de *clusters* e cálculo de volumes.

Como referido, simultaneamente a estes levantamentos com *laser scanner* foram realizados levantamentos fotográficos para processamento fotogramétrico.

A primeira época de observação - Época 0 (FT0) - coincidiu com o primeiro levantamento com *laser scanner* (TLS0), em Março de 2012, bem como a Época 2 (FT2 e TLS2), em Abril de 2014. As épocas 1 (FT1) e 3 (FT3) não foram realizadas simultaneamente a qualquer levantamento com *laser scanner* (Tabela 6).

A última época de observação (FT3) foi executada após a indicação da ocorrência de uma significativa queda de blocos na praia da Bafureira, por parte da APA, I.P., que teve lugar a 10/10/2014. O levantamento desta ocorrência foi realizado imediatamente após recebida a informação, a 23/10/2014, demonstrando a flexibilidade do método em casos em que é necessária atuação rápida. Por esse motivo, o intervalo temporal entre as épocas 2 e 3, no que respeita os levantamentos fotogramétricos, é de apenas 6 meses, enquanto que os restantes estão desfasados 12 meses.

Tabela 6 - Características dos levantamentos fotogramétricos terrestres na Praia da Bafureira

Levantamentos por fotogrametria terrestre						
Época	Data	N.º Imagens	Erro total final ⁶	Georreferenciação e RMS médio nos PFs	Nuvens de pontos	
					Num. (milhões)	Dimensão do ficheiro (Gb)
Época 0 (FT0)	27/03/2012	36	0.24	6 Alvos Leica e reflectores RMS = 0.048 m	≈ 26	≈ 1.8
Época 1 (FT1)	02/04/2013	114	0.52	5 PF naturais RMS = 0.047 m	≈ 95	≈ 3.7
Época 2 (FT2)	07/04/2014	119	1.18	5 PF naturais (FT1) RMS = 0.213 m	≈ 8	≈ 0.4
Época 3 (FT3)	23/10/2014	99	0.31	5 PF naturais (FT1) RMS = 0.029 m	≈ 17.5	≈ 1

As alterações na face das arribas da Praia da Bafureira foram contabilizadas usando os levantamentos fotogramétricos FT0 a FT3, totalizando assim um período de monitorização de 54 meses.

⁶ Erro total final adimensional (ver Capítulo 3)

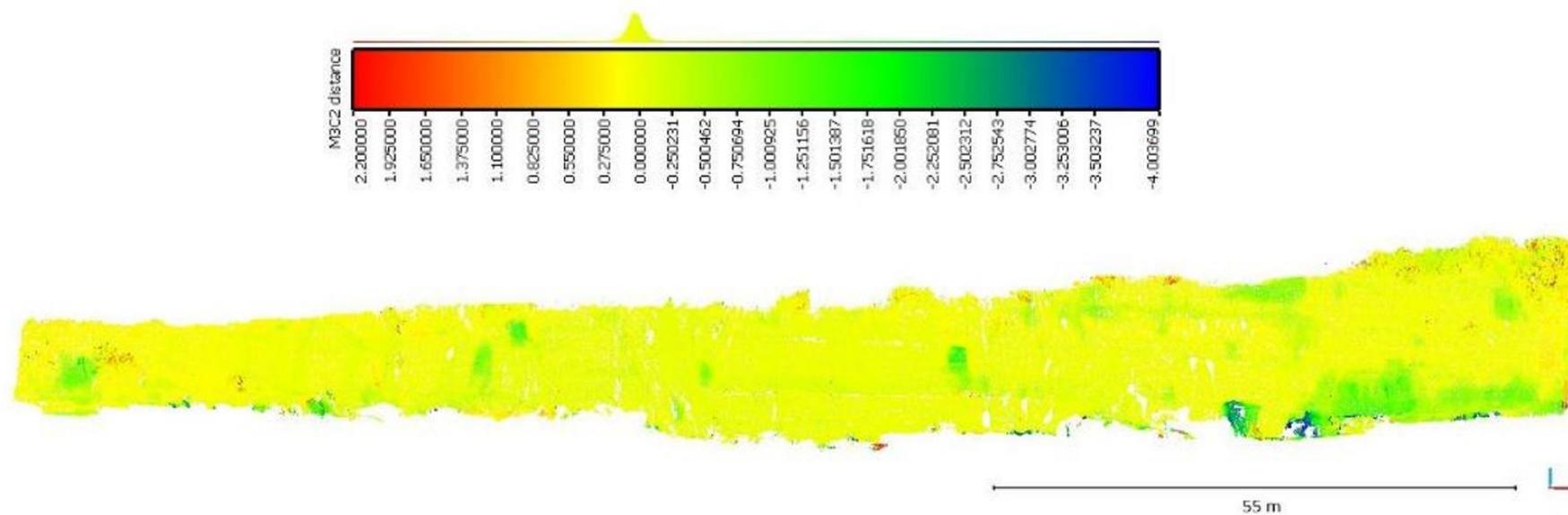


Figura 50 - Nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 com as nuvens de TLS0 e TLS2 (27/03/2012 e 07/04/2014) na arriba da praia da Bafureira.

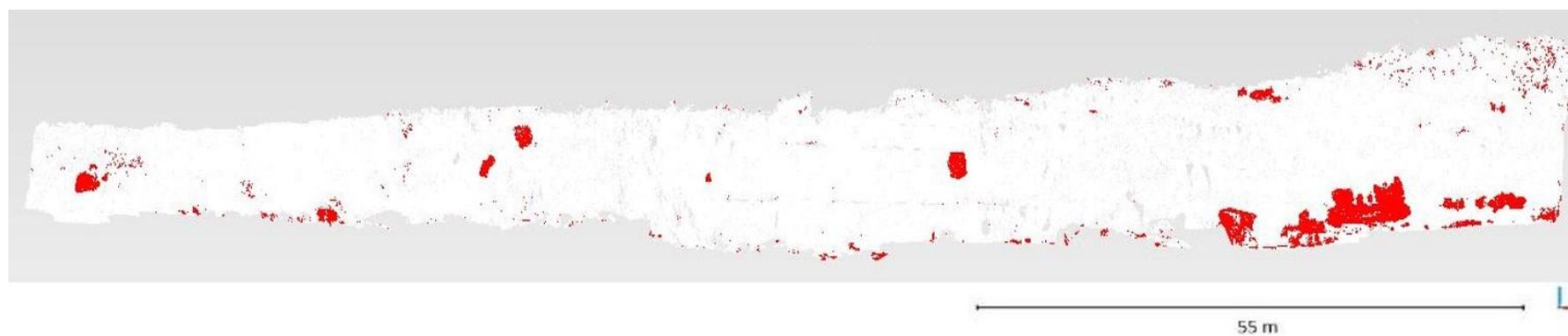


Figura 51 - Nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa –(a vermelho superior a 95% de confiança).

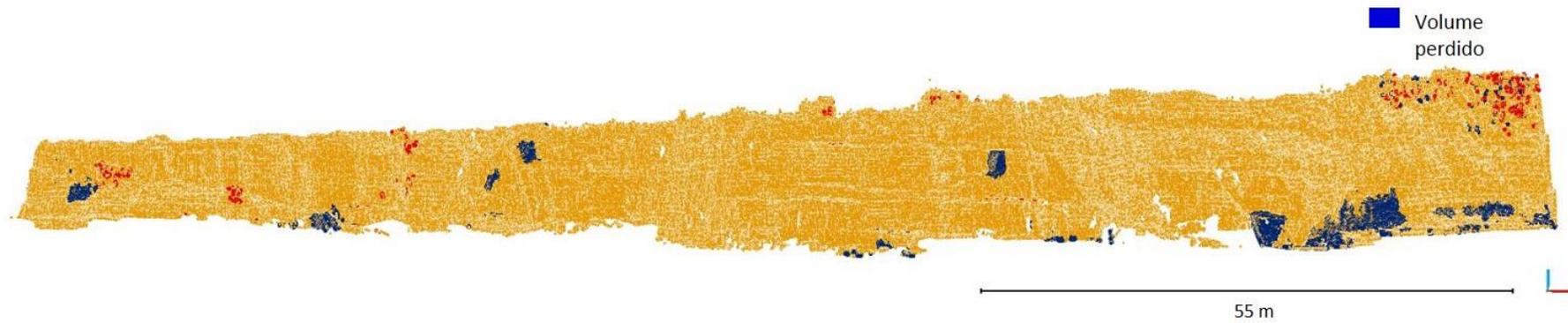


Figura 52- Clusters de alterações correspondentes a perda de material (a vermelho zonas de alteração positiva, ou de ganho de volume, causada por existência de vegetação), calculados automaticamente com o programa VOLTERRE.

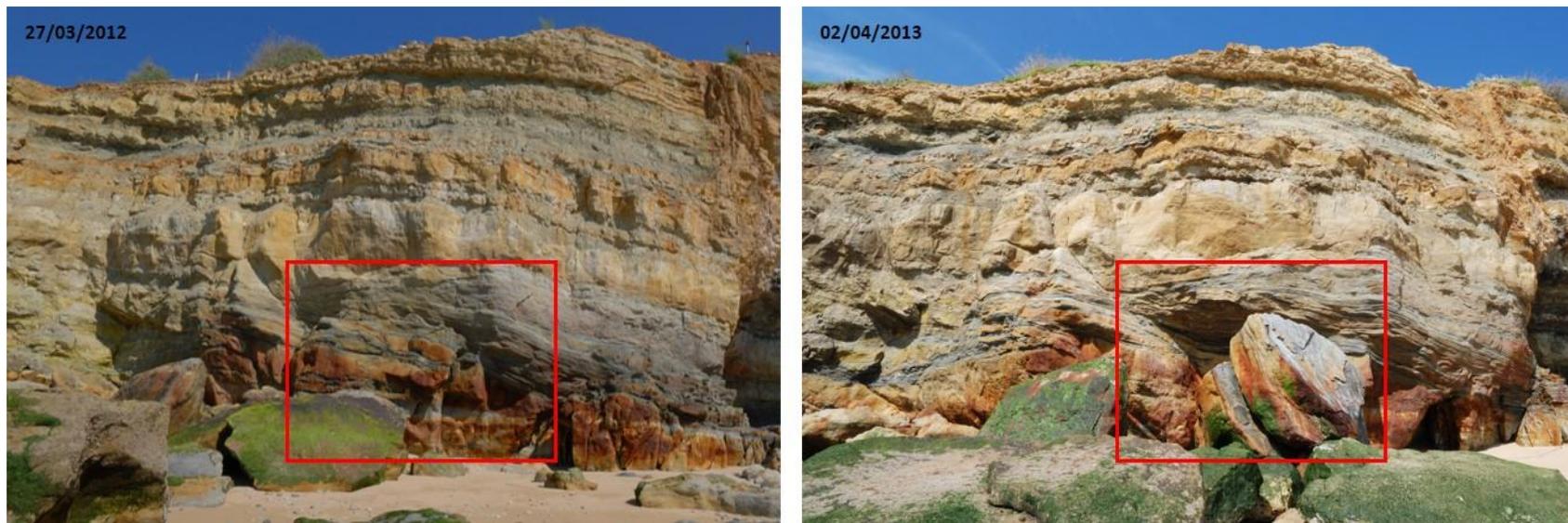


Figura 53 – Exemplo de bloco caído entre épocas de observação, detetado como alteração na nuvem de pontos.

Os resultados que se apresentam relativamente à evolução das arribas correspondem à comparação das épocas FT0, FT1, FT2 e FT3, isto é, de 27/03/2012 a 23/10/2014, sendo que em todas as épocas a arriba foi dividida em 3 segmentos mais pequenos, de oeste para este – Sector 1, 2 e 3 (Figura 54).



Figura 54 – Divisão do segmento em estudo em sectores de menor dimensão.

É importante salientar duas questões que tiveram de ser tidas em conta, tanto na deteção de alterações na face da arriba por diferenças nas nuvens de pontos de diferentes épocas, como no cálculo dos volumes deslocados (perdidos ou ganhos):

- 1) Em todo o segmento, existe densa vegetação no topo da arriba, que cresce e pende pela face da arriba. Entre épocas, estas manchas de vegetação aparecem muitas vezes como alterações na face da arriba: de facto são alterações, mas que não correspondem a perdas ou ganhos de material rochoso, pelo que não devem ser consideradas;
- 2) Em todo o segmento, as arribas são verticais e o material que se perde na face da arriba, na grande maioria blocos rochosos, é imediatamente acumulado na base ou nas imediações; materiais de menor dimensão são removidos da base com facilidade em cada período de preia-mar, altura em que a base da arriba é atuada pela agitação marítima;
- 3) Blocos de grande dimensão, em grande quantidade e sobrepostos na base da arriba, não são passíveis de ser modelados a partir do ponto de vista quer do *laser scanner* quer da câmara fotogramétrica, no contexto de um levantamento sistemático para monitorização da face da arriba.

Perante estas situações, a determinação de volumes acumulados não foi considerada para o estudo uma vez que os valores poderão não refletir o fenómeno neste local.

Sector 1, 27/03/2012 (FT0) a 02/04/2013 (FT1): neste sector, no intervalo de tempo analisado, verifica-se na nuvem de diferenças a deteção de uma alteração na face da arriba (Figura 55) que provocou uma perda de material que corresponde à queda de um bloco junto ao topo da arriba, conforme verificado por análise comparada das imagens RGB de ambas as datas (Figura 57). O programa VOLTERRE estimou o valor de material perdido nesse movimento em cerca de $3.02 \pm 0.3 \text{ m}^3$.

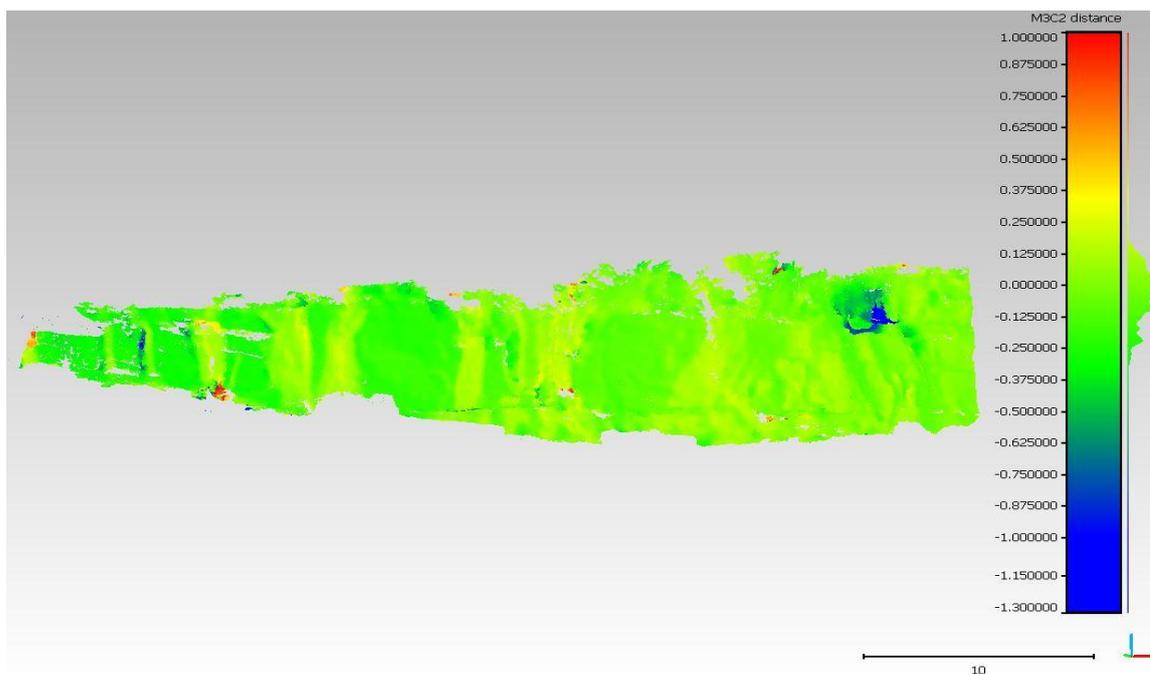


Figura 55 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 1 entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).



Figura 56 - Sector 1: cartografia de material movimentado entre FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).

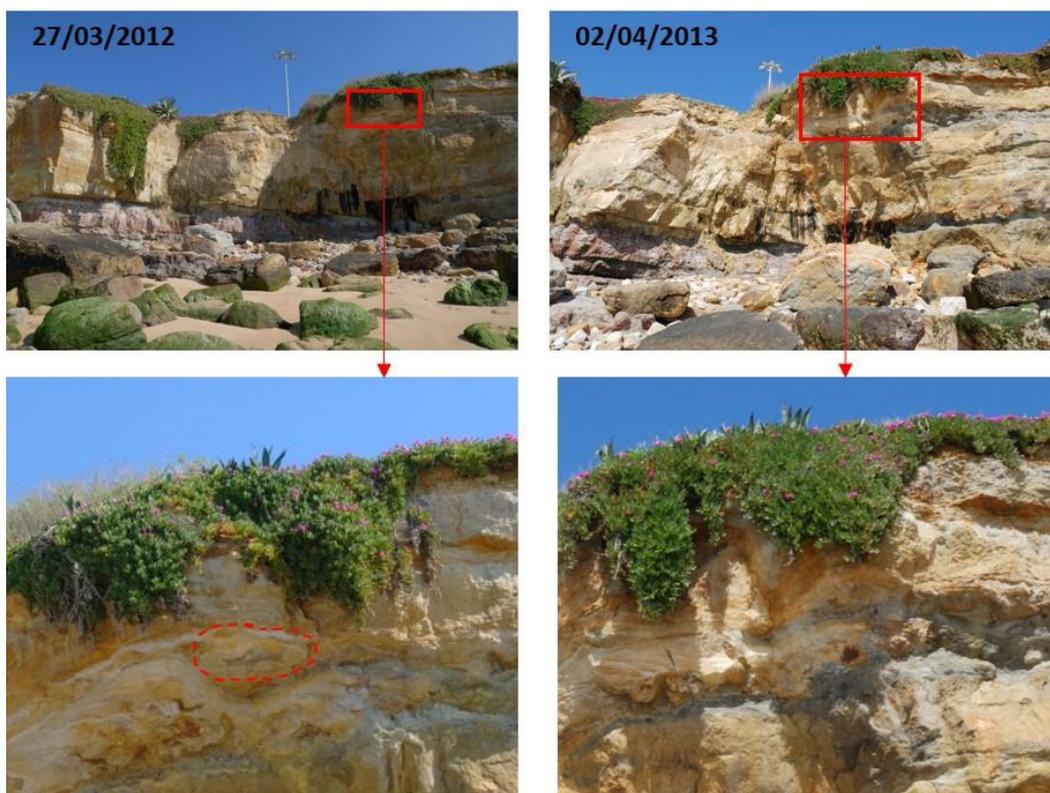


Figura 57 – Exemplo de bloco detetado pelo algoritmo M3C2, verificado por comparação entre as imagens das duas datas que fecham o intervalo temporal de deteção de alterações FT0-FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).

Sector 2, 27/03/2012 (FT0) a 02/04/2013 (FT1): neste sector verificou-se a perda de um bloco que causou uma alteração da ordem de 1m (em profundidade) na face da arriba. Com o programa VOLTERRE, o volume perdido na face da arriba foi estimado em $1.27 \pm 0.1 \text{ m}^3$.

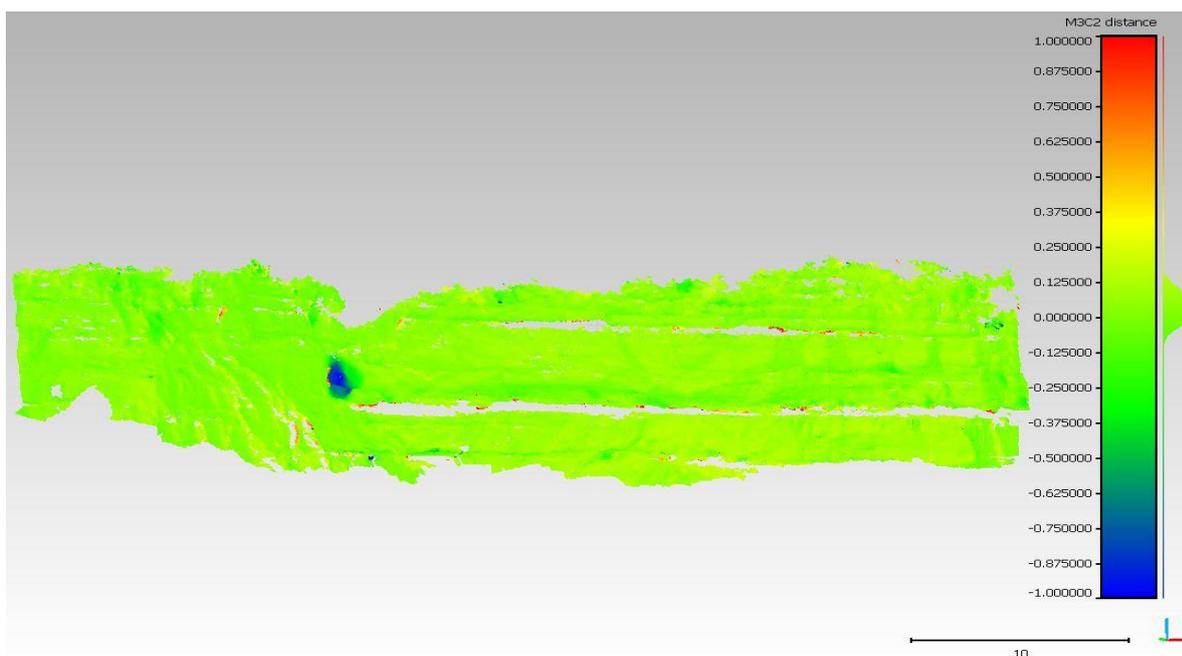


Figura 58 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 2 entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).

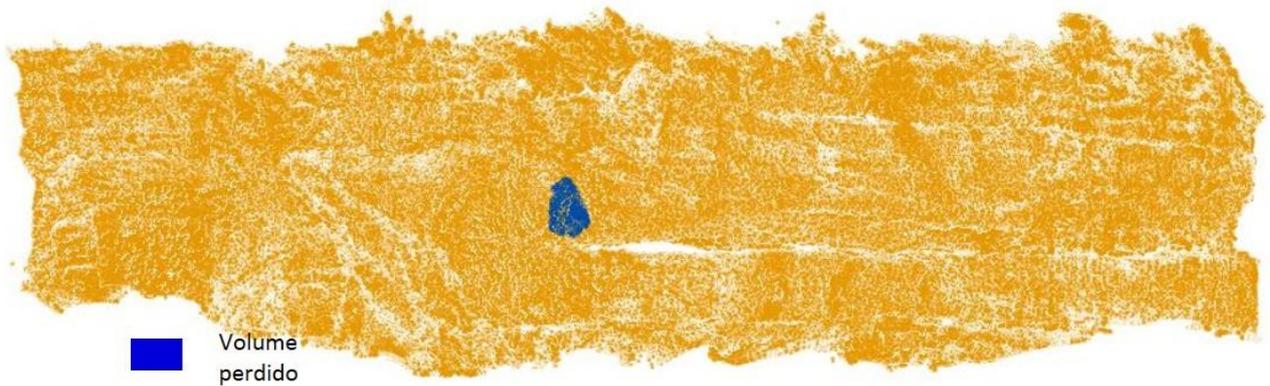


Figura 59 - Sector 2: cartografia de material movimentado entre as épocas entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).

Sector 3, 27/03/2012 (FT0) a 02/04/2013 (FT1): verifica-se que neste sector, no período de cerca de 12 meses as alterações são significativas, tendo sido detetadas duas zonas de alteração na ordem de 1 m, em profundidade. Verifica-se ainda uma lacuna de informação junto à base da arriba, correspondente a uma zona onde houve, efetivamente, uma queda de um bloco. No entanto, pelas suas dimensões e posição junto ao sopé da arriba, a zona em questão não foi na totalidade calculada pelo algoritmo M3C2, apresentando um valor máximo local de recuo de 2.98 m. Com a exceção desta lacuna, não contabilizada pelo motivo descrito, o programa VOLTERRE estimou um volume total de material perdido na face da arriba de $14.61 \pm 1.4 \text{ m}^3$.

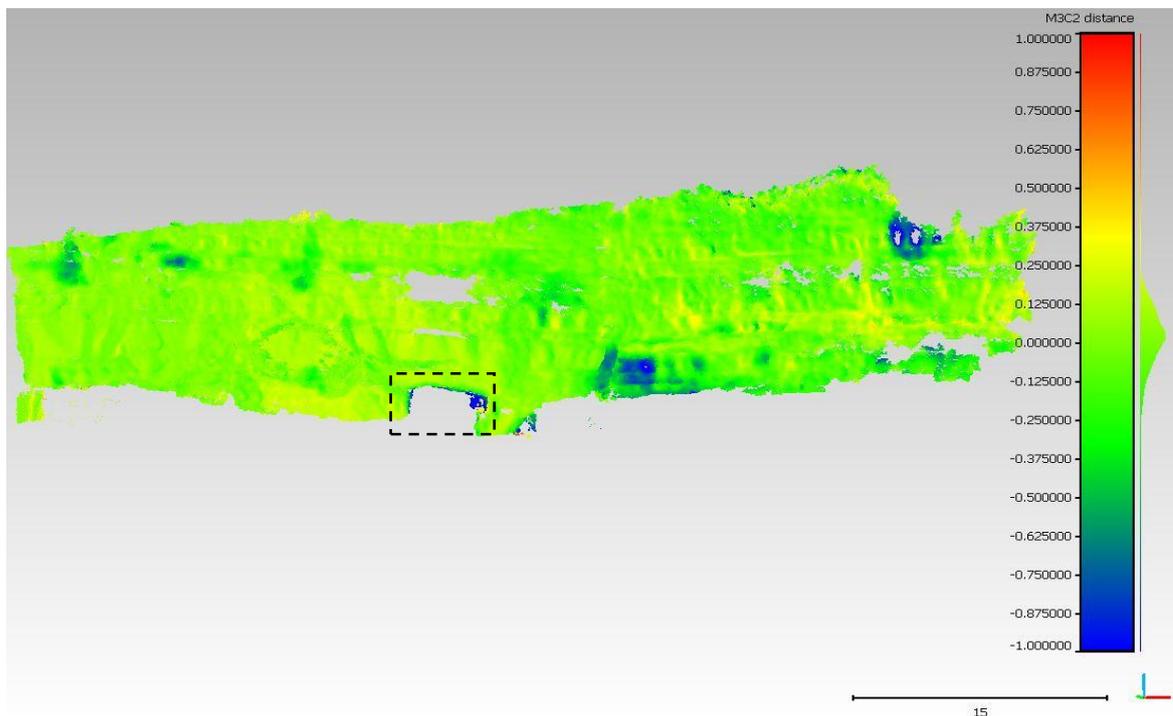


Figura 60 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 3 entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013) (assinalado na imagem a zona de recuo local máximo de 2.98 m).

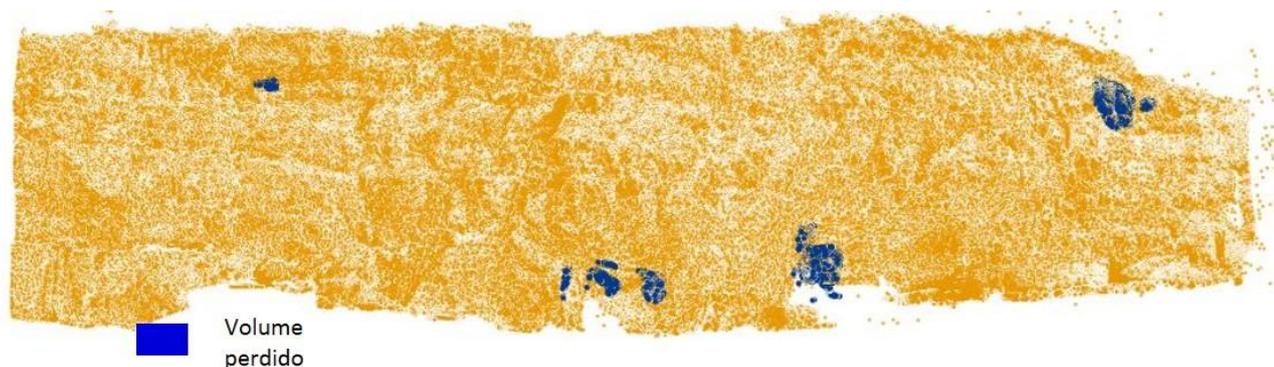


Figura 61 - Sector 3: cartografia de material movimentado entre as épocas FT0 e FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013).

Sector 1, 02/04/2013 (FT1) a 07/04/2014 (FT2): verifica-se pouca alteração no período de 1 ano. Os valores de diferenças calculados encontram-se em redor dos 0m, num intervalo que se pode desprezar para efeitos de contabilização de alterações. Observa-se duas regiões de alteração com significado, sendo que a assinalada com o retângulo corresponde efetivamente a perda de material rochoso (Figura 62). A alteração detetada próxima do topo da arriba corresponde a uma variação de volume relacionada com o crescimento de vegetação, pelo que não deverá ser contabilizada para balanço de volumes. O total de volume perdido foi calculado em $28.28 \pm 2.8 \text{ m}^3$ (Figura 63).

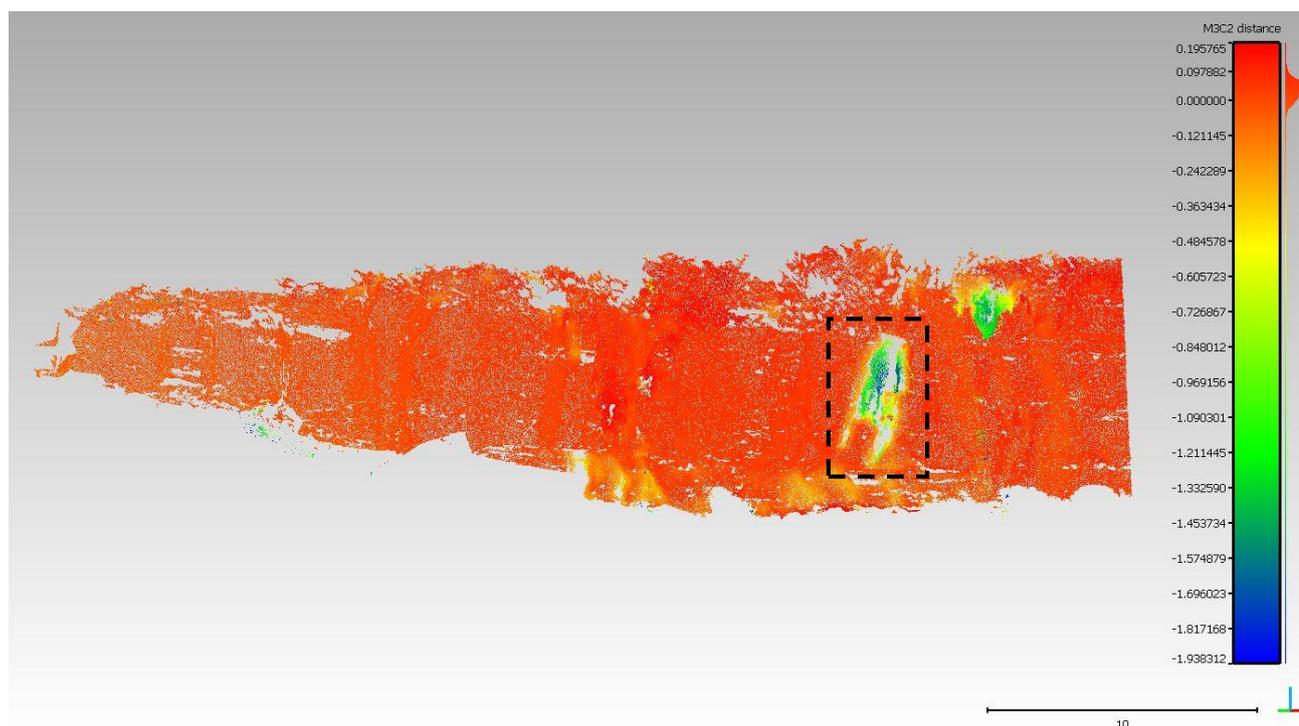


Figura 62 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 1 entre as épocas FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).



Figura 63 - Sector 1: cartografia de material movimentado entre FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).

Sector 2, 02/04/2013 (FT1) a 07/04/2014 (FT2): observa-se a ocorrência de duas alterações de maior dimensão e algumas diferenças menores (Figura 64). Por comparação com as nuvens de pontos com informação RGB, verifica-se que correspondem de facto a movimentos de vertente na face da arriba, sendo o mais evidente, a Leste, correspondente a duas quedas de blocos, com volume calculado de $4.8 \pm 0.5 \text{ m}^3$. No total, foram perdidos da face da arriba $5.41 \pm 0.5 \text{ m}^3$ de material (Figura 65).

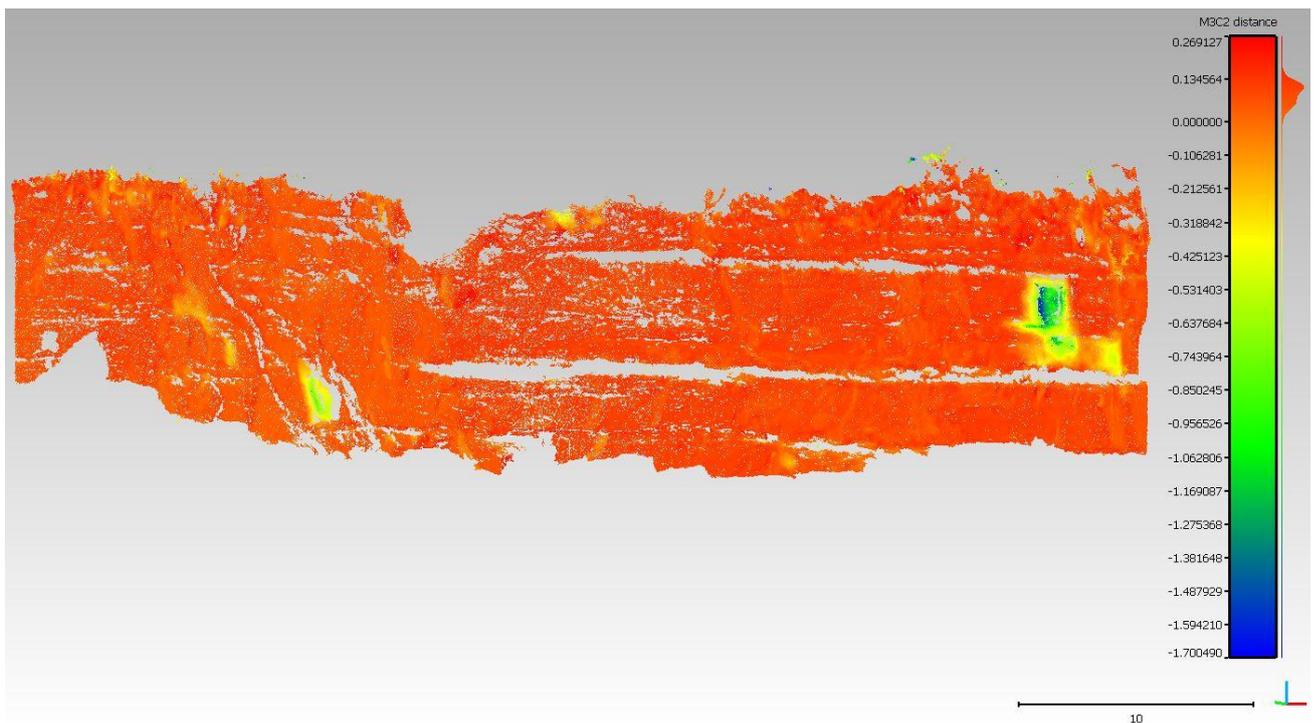


Figura 64 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 2 entre as épocas FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).



Figura 65 – Sector 2: cartografia de material movimentado entre FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).

Sector 3, 02/04/2013 (FT1) a 07/04/2014 (FT2): este sector é o que mais alterações sofreu ao longo do período de monitorização, e aquele que maior risco poderá colocar a pessoas e bens, uma vez que se encontra sobre o areal da praia da Bafureira e ladeia o edifício do restaurante. Este sector foi alvo de intervenções antrópicas, antes e durante a monitorização. Foram realizados saneamentos na face da arriba para desmonte de material instável e recuperação do muro do restaurante, por diversas vezes destruído por instabilidades. A zona junto ao muro encontra-se neste momento estabilizada com uma estrutura de contenção de betão projetado. Entre o levantamento da Época 1 e o da Época 2 (Figura 66) foram contabilizados $108.24 \pm 10.8 \text{ m}^3$ de volume perdido neste sector (Figura 67).

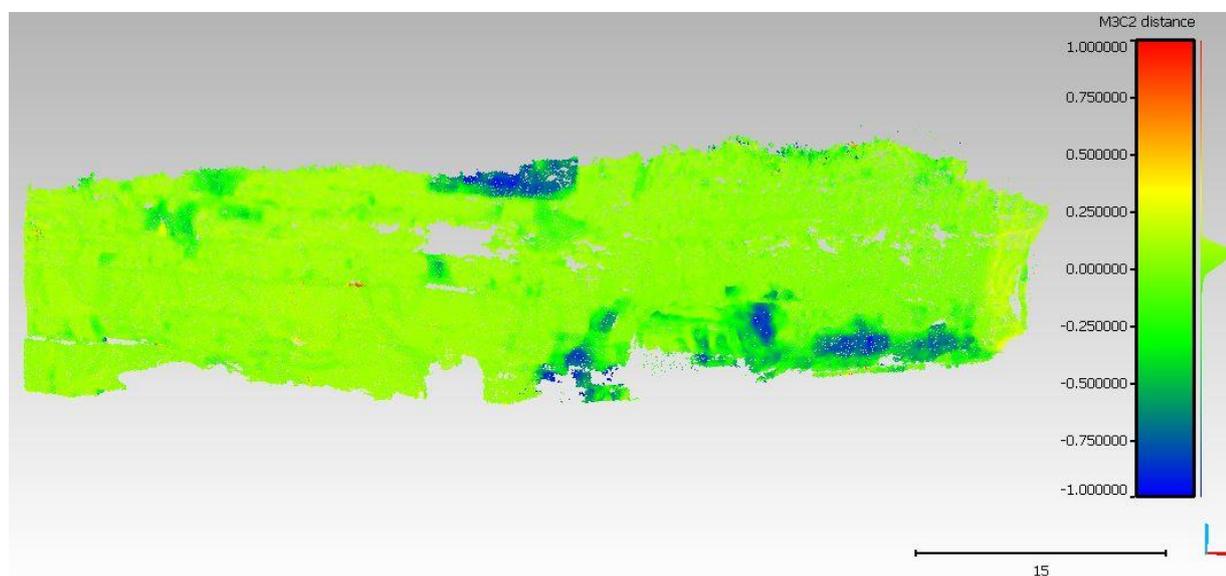


Figura 66 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 3 entre as épocas FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).

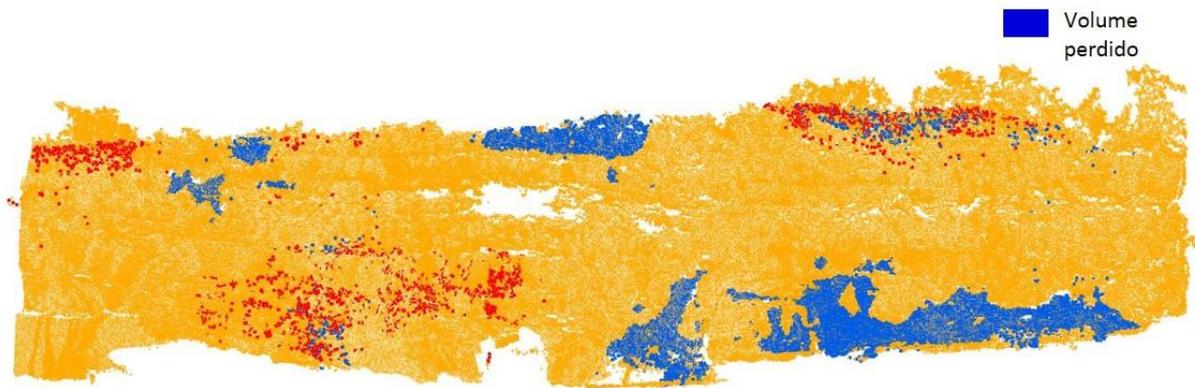


Figura 67 – Sector 3: cartografia de material movimentado entre FT1 e FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014).

A título de exemplo, observa-se na Figura 68 a queda de blocos ocorrida no topo da arriba, no local onde, posteriormente, em Outubro de 2014, ocorreu um movimento de grandes dimensões.



Figura 68 – Exemplo de perda de material no topo da arriba, visível por comparação de imagens originais do levantamento fotogramétrico.

Sector 1, FT2 (07/04/2014) a FT3 (23/10/2014): neste período de 6 meses, não foram observadas ocorrências significativas, havendo a registar alterações junto ao sopé da arriba, que o programa VOLTERRE estimou em cerca de $2.86 \pm 0.3 \text{ m}^3$ de material perdido. Embora de dimensões reduzidas, a perda de material junto ao sopé das arribas é um aspeto relevante pois se trata de um processo erosivo que leva à perda de suporte das camadas de material subjacentes.

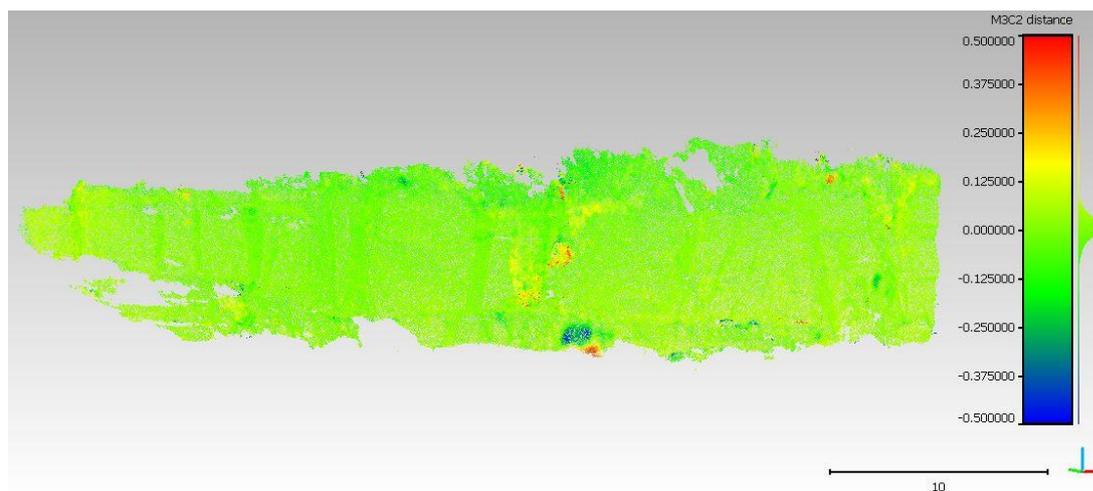


Figura 69 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 1 entre as épocas FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).



Figura 70 - Sector 2: cartografia de material movimentado entre FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).

Sector 2, FT2 (07/04/2014) a FT3 (23/10/2014): neste sector verificou-se uma perda substancial de material mais superficial, num total de volume deslocado de cerca de $17.75 \pm 1.8 \text{ m}^3$.

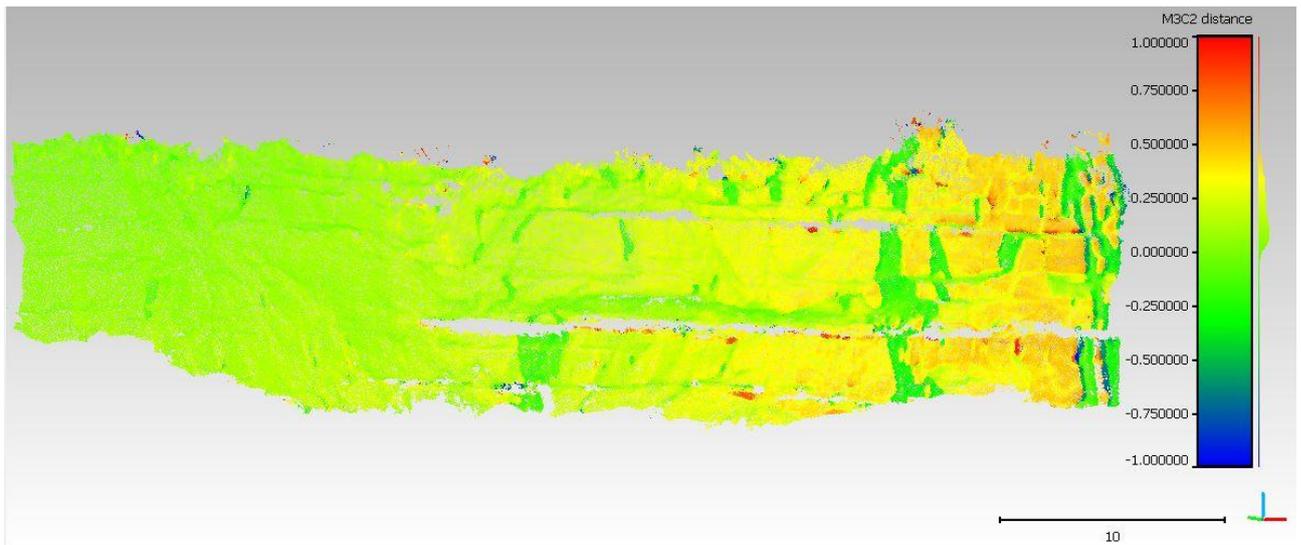


Figura 71 - Nuvem de diferenças calculada para deteção de alterações ocorridas no sector 2 entre as épocas FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).

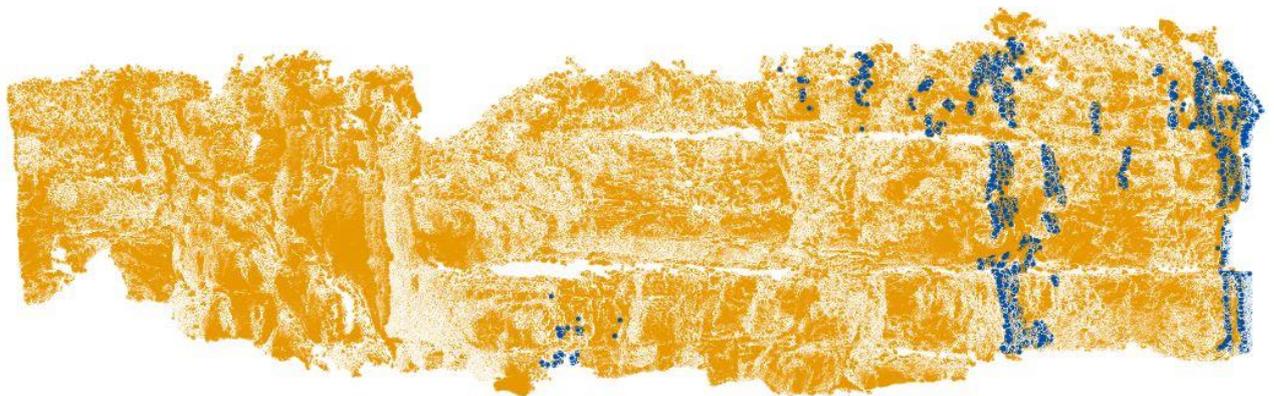


Figura 72 - Sector 2: cartografia de material movimentado entre FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).

Sector 3, FT2 (07/04/2014) a FT3 (23/10/2014): o movimento ocorrido neste sector, que foi reportado pela APA, I.P., motivou a execução desta Época 3 de observação (Figura 73). Embora o movimento tenha ocorrido a 10/10/2014, apenas a 23/10/2014 foi reportado.

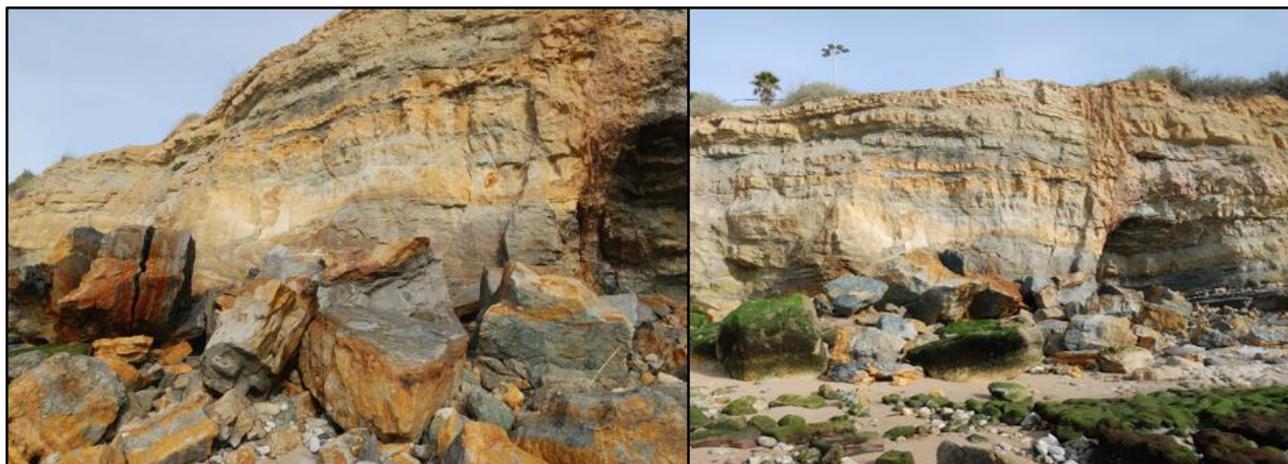


Figura 73 – Queda de blocos na praia da Bafureira, ocorrida a 10/10/2014.

Verifica-se a acumulação de grandes blocos na base da arriba, que constituem um bloqueio de visão para parte da face que foi afetada pelo movimento (Figura 74).

Pela sua dimensão, o depósito do movimento não é passível de ser modelado mas é relevante a contabilização do volume perdido na face. Este movimento gerou o deslocamento de cerca de $141.31 \pm 14.1\text{m}^3$ de material (Figura 75).

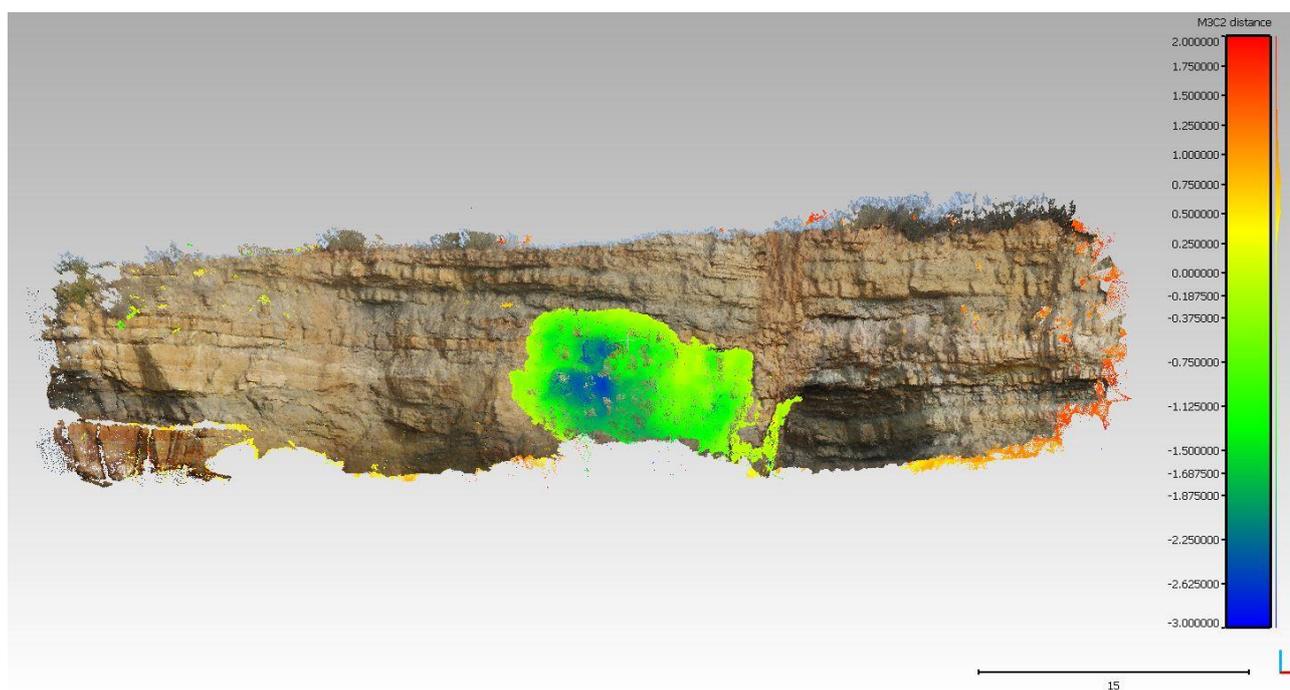


Figura 74 - Sector 3: Evolução entre FT2 e FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014).

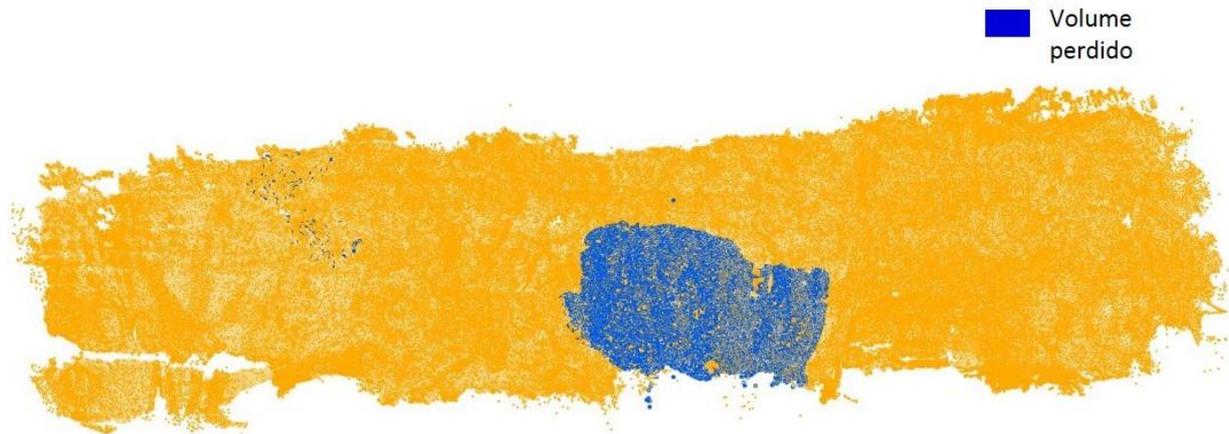


Figura 75 – Sector 3: Cartografia de áreas de volumes deslocados por queda de blocos a 10/10/2014.

A obtenção de dados rigorosos de volume perdido num determinado período de tempo, ao longo de uma face de arriba, permite estimar a taxa de recuo médio sofrido pela arriba através de uma simples relação entre volume e área:

$$\text{Taxa média de recuo} = \frac{\text{Volume}}{\text{Area}} / \text{anos}$$

Assim, ao longo dos dois anos de monitorização, foi contabilizado um total de 322.75 m³ de volume perdido, por fotogrametria, e 286.37 m³, por *laser scanning*, numa área de estudo de cerca de 3040 m².

Os dados de taxa de recuo são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Taxa de recuo médio anual para a praia da Bafureira

Bafureira	Volume perdido (m ³)	Área (m ²)	Intervalo de tempo (anos)	Taxa recuo médio anual (m/ano)
TLS	286.37	3040	2	0.4x10 ⁻¹
FT	322.75	3040	2.5	0.4x10 ⁻¹

5.1.3.2 Praia do Porto da Calada

A praia do Porto da Calada apresenta uma morfologia de praia encaixada, rodeada por arribas quase verticais, que atingem perto de 80m de altura no sector sul. Apresenta declives médios, calculados a partir da cartografia 1:2000 datada de 2002, na ordem dos 60°, atingindo os 82° na arriba sul.

Os acessos a esta praia são realizados por uma rodovia, escavada na escarpa que bordeja esta praia do lado Este e que percorre toda a extensão vertical do talude até à zona do areal, onde existe um apoio de praia.

Dada a sua morfologia complexa, muito côncava, a análise que se faz a esta praia e os levantamentos que se realizaram para monitorização das arribas é descrita separadamente para os 4 sectores indicados na Figura 76 como Arriba N, Arriba N central, Talude da estrada e Arriba S (Figura 77).



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

Figura 76 - Enquadramento das arribas da praia do Porto da Calada.



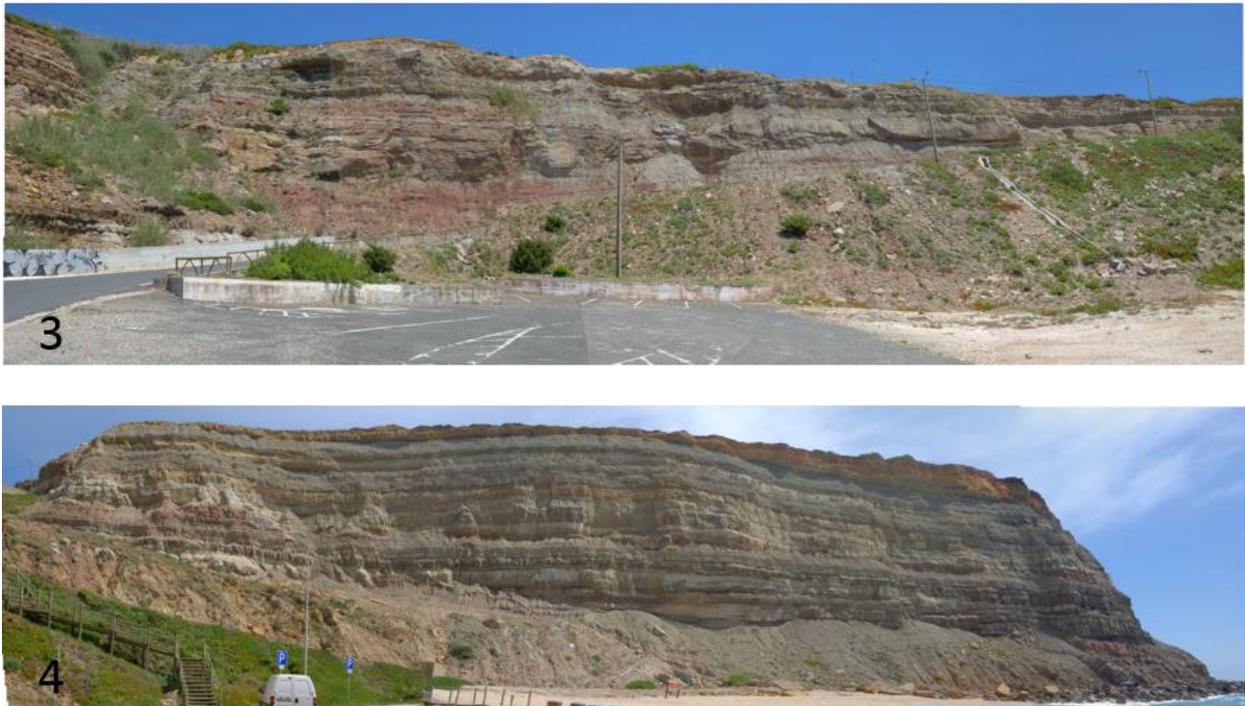


Figura 77 – Subdivisão da praia do Porto da Calada em sectores: 1) Arriba N, 2) Arriba N central, 3) Talude da estrada e 4) Arriba S.

Relativamente aos aspetos geológicos, ocorrem, de norte para sul, as seguintes formações: Formação de Porto Calada (C1PC) do Tithoniano-Berriasiano (152-159 Ma), a Formação de Vale de Lobos (C1VL) do Berriasiano-Valanginiano (145-132 Ma), Formação de São Lourenço e de Santa Susana indiferenciadas (C1LS) de idade atribuível ao Valanginiano-Hauteriviano basal (132-129 Ma), e por fim, a Formação de Freixial (J3Fr), com gênese entre os 152-145 Ma (Tithoniano). Estas formações apresentam, do ponto de vista litológico, alternâncias de arenitos e pelitos (mais frequentes na vertente sul) com bancadas compostas por calcários margosos e dolomitos. A cobrir a vertente sul observam-se depósitos de terraços marinhos do Quaternário (Qm) (Figura 79).

A estrutura geológica existente é normal, consequência da estratificação horizontal das bancadas presentes.

Em todos os sectores desta praia verificam-se várias situações que potenciam instabilidade nas faces e cristas das arribas, e ainda nos depósitos de vertente. Estão presentes em todos os sectores sequências de camadas resistentes – calcários, calcarenitos e arenitos -, de maior ou menor espessura, intercaladas com camadas de materiais mais brandos – níveis margosos, argilo-margosos e argilitos – que, sofrendo processos de erosão diferencial, formam bancadas salientes em consola (sem suporte).

As camadas mais resistentes apresentam níveis de fraturação que originam blocos de dimensão decimétrica a métrica e que facilmente se desprendem da face da arriba pela ausência de suporte. As camadas de material mais brandos são progressivamente erodidas pelos normais processos de erosão e pela intensa alteração causada por escorrência e exurgências de água que são visíveis em todos os sectores.

Na base da arriba sul, contíguos ao areal, existem depósitos de vertente que atingem os 20m de altura, compostos por material fino e blocos de dimensão métrica.

A norte, embora a base da arriba apresente depósitos com blocos de grandes dimensões, ela é atuada diretamente pela ondulação marítima pelo que o areal disponível para uso balnear é relativamente reduzido.

À data dos trabalhos, do ponto de vista da vulnerabilidade de pessoas e bens, todos estes sectores eram passíveis de provocar danos. O talude da estrada de acesso à praia apresentava as infraestruturas de protecção algo danificadas, e o sector da arriba norte que ainda acompanha parte da rodovia não tinha qualquer estrutura de protecção, colocando em perigo pessoas e veículos que circulassem nestes troços; o parque de estacionamento estava vulnerável a possíveis deslizamentos que poderiam ocorrer nos depósitos de vertente e aterro, bem como o estacionamento inferior; os acessos pedonais à praia eram feitos por duas escadas de madeira assentes nestes depósitos e o apoio de praia existente encontrava-se ao alcance de um deslizamento.

A partir de Agosto de 2014, a praia foi interdita pela APA, I.P. para obras de estabilização das arribas, tendo sido intervencionados todos os sectores para implementação de estruturas de contenção (reforço de redes metálicas e construção e/ou melhoramento de valas e muros de contenção) e saneamento de blocos instáveis (GeoÁrea, 2011) (Figura 78).



Figura 78 – Exemplo da intervenção para estabilização de zonas instáveis na arriba Sul: saneamento de blocos instáveis, colocação de rede metálica tensionada em cortina e plataforma de retenção escavada nos depósitos de vertente (GeoÁrea, 2011). Imagens de Sónia Queiroz, 19/03/2014.

Foram realizados dois levantamentos com o *laser scanner* do IDL -TOPCON GLS-1500 (Figura 80), em duas épocas de observação com um intervalo de cerca de 12 meses: 17/07/2012 e 28/06/2013.



Figura 79 - Enquadramento geológico e morfológico das arribas da praia do Porto da Calada: Formação de Porto Calada (C 1 PC), a Formação de Vale de Lobos (C 1 VL), Formação de São Lourenço e de Santa Susana indiferenciadas (C 1 LS) e Formação de Freixial (J 3 Fr); polígono a vermelho delimita a zona da face das arribas.



Figura 80 – Estacionamento do laser scanner e preparação de material para levantamento do talude da estrada.

O esquema de levantamento que se apresenta na Figura 81 foi elaborado após o levantamento de 17 de Julho de 2012, para esquematizar as estações de varrimento do laser, corrigindo o planeamento prévio. Uma vez que a morfologia da praia e as condições de coordenação de pontos no terreno com recurso a GPS-RTK são complexas (o necessário acesso à rede de telemóvel é muito difícil no local), não se poderia prever exatamente *a priori* quais as posições ideais para as estações do laser scanner e qual a técnica de georreferenciação mais adequada.

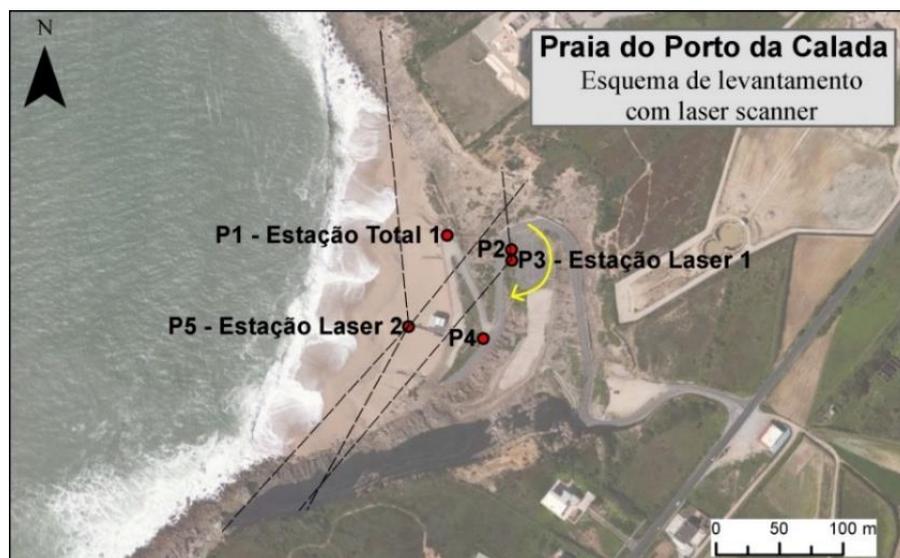


Figura 81 - Esquema de levantamento com laser scanner na Praia do Porto da Calada.

Em ambas as campanhas foram obtidas 3 nuvens de pontos distintas. As três nuvens de pontos tridimensionais do levantamento foram georreferenciadas a partir das coordenadas das posições do *laser scanner* (P3 e P5) e de um ponto de coordenadas conhecidas (P4) onde se posicionou o alvo necessário à georreferenciação do *laser scanner*. A coordenação dos pontos foi realizada com recurso ao recetor já descrito. As nuvens foram registadas posteriormente, resultando uma nuvem única com informação X,Y,Z, e ainda intensidade do sinal recebido, I.

Após edição manual para eliminação de pontos fora da área de interesse, a nuvem final apresenta cerca de 62 milhões de pontos 3D (1.88Gb). A secção correspondente à escarpa central apresenta a resolução nominal mais elevada aplicada, de forma a tentar minimizar a presença desvantajosa, do ponto de vista do estudo, da rede de contenção de detritos e blocos que aqui funciona como um obstáculo à função dos feixes laser que deveriam ser refletidos apenas pela parede da escarpa.

Seguindo o mesmo procedimento do primeiro levantamento, o segundo foi realizado cerca de 12 meses depois para determinar possíveis alterações ocorridas nos sectores em análise, desta vez com registo fotográfico integrado (Figura 82). O levantamento de imagem permitiu não só atribuir valores RGB a cada ponto registado, obtendo-se uma nuvem final com valores de X,Y,Z,I,R,G,B para cada ponto, mas também delimitar, com base nas imagens obtidas pelo instrumento pré-levantamento, as regiões de interesse a serem cobertas, garantindo que as zonas de interesse são melhor cobertas no varrimento e que zonas que estão fora da região de interesse não pesam desnecessariamente (em tempo de execução e no tamanho dos ficheiros finais). O processo de georreferenciação foi igual ao executado no primeiro levantamento.

A nuvem final, após registo das 3 nuvens e edição manual, apresenta cerca de 33 milhões de pontos 3D.

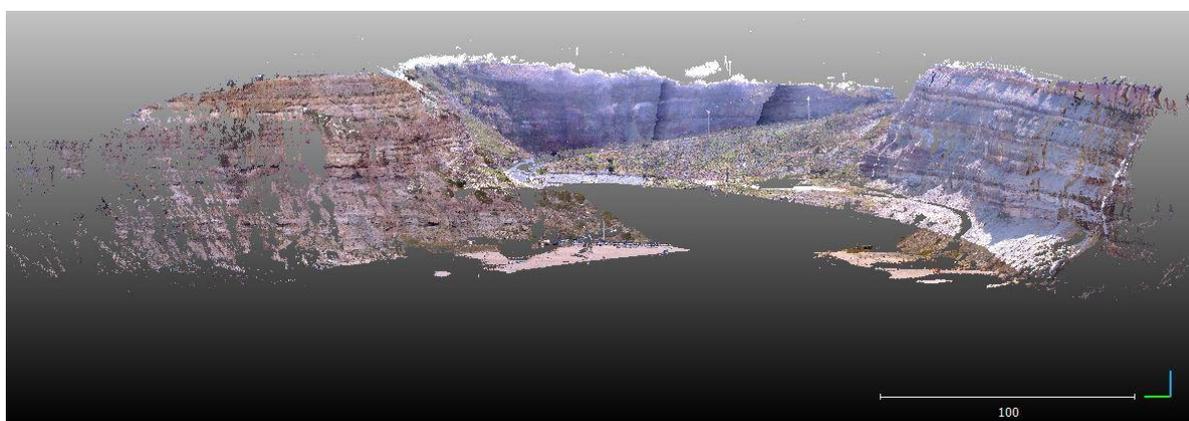


Figura 82 - Nuvem de pontos 3D obtida por varrimento com laser scanner, com radiometria associada.

➤ Resultados da evolução das arribas entre Julho de 2012 e Julho de 2013

Utilizando como nuvem de diferenças a gerada pelo algoritmo C2C com modelo local *height function* para análise de alterações, registam-se pequenas alterações sendo que as mais significativas ocorreram no talude de acesso ao parque de estacionamento. A nuvem de diferenças (Figura 83) assinala três regiões de alterações significativas - Casos A, B e C:

- Caso A: no talude, tanto na parede como na zona de acumulação de material caído, registam-se diferenças superiores a 0.5m. Verifica-se, pela comparação de fotografias no local, uma queda de blocos, ocorrida entre Dezembro de 2012 e Junho de 2013;

- Caso B: onde na nuvem de diferenças não são registadas alterações, também se verifica por análise das fotografias no local que o talude se manteve inalterado;

- Caso C: nesta zona, entre as duas épocas de observação verificam-se alterações que correspondem, de facto, a movimentação de blocos das camadas superiores e acumulação destes e de detritos no talude da estrada, mas também uma alteração que se deve ao aparecimento de vegetação de uma época para outra. Este caso demonstra a potencialidade da deteção de alterações utilizando a comparação nuvem a nuvem mesmo em situações mais complexas.

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

Na Figura 83, assinala-se também uma região (retângulo inferior) onde são detetadas alterações profundas, de dimensões até 2m. Esta zona corresponde a vegetação que, de uma época para a seguinte, se desenvolveu nos depósitos de aterro que ladeiam o parque de estacionamento, bem como algumas variações devidas a presença de veículos ou pessoas numa época e ausência na outra. Esta situação, a par do Caso C, demonstram claramente a importância que o registo de imagem tem para a correta classificação de alterações como movimentos de massa.

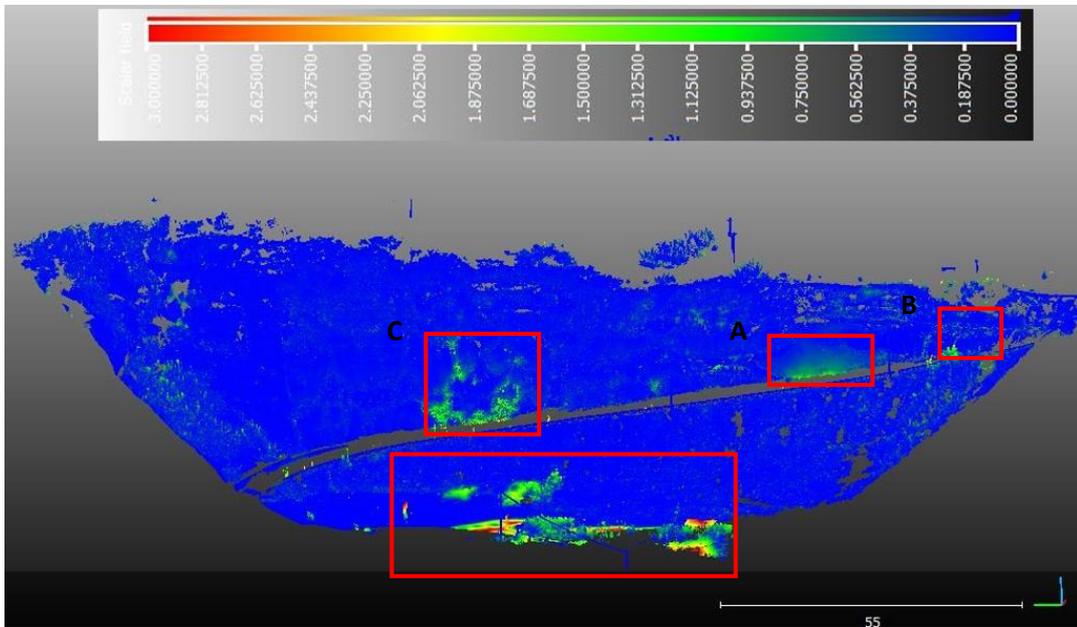


Figura 83 – Nuvem de diferenças absolutas da zona do talude da estrada, onde se apresentam as alterações ocorridas entre as duas épocas de observação por laser scanner terrestre.



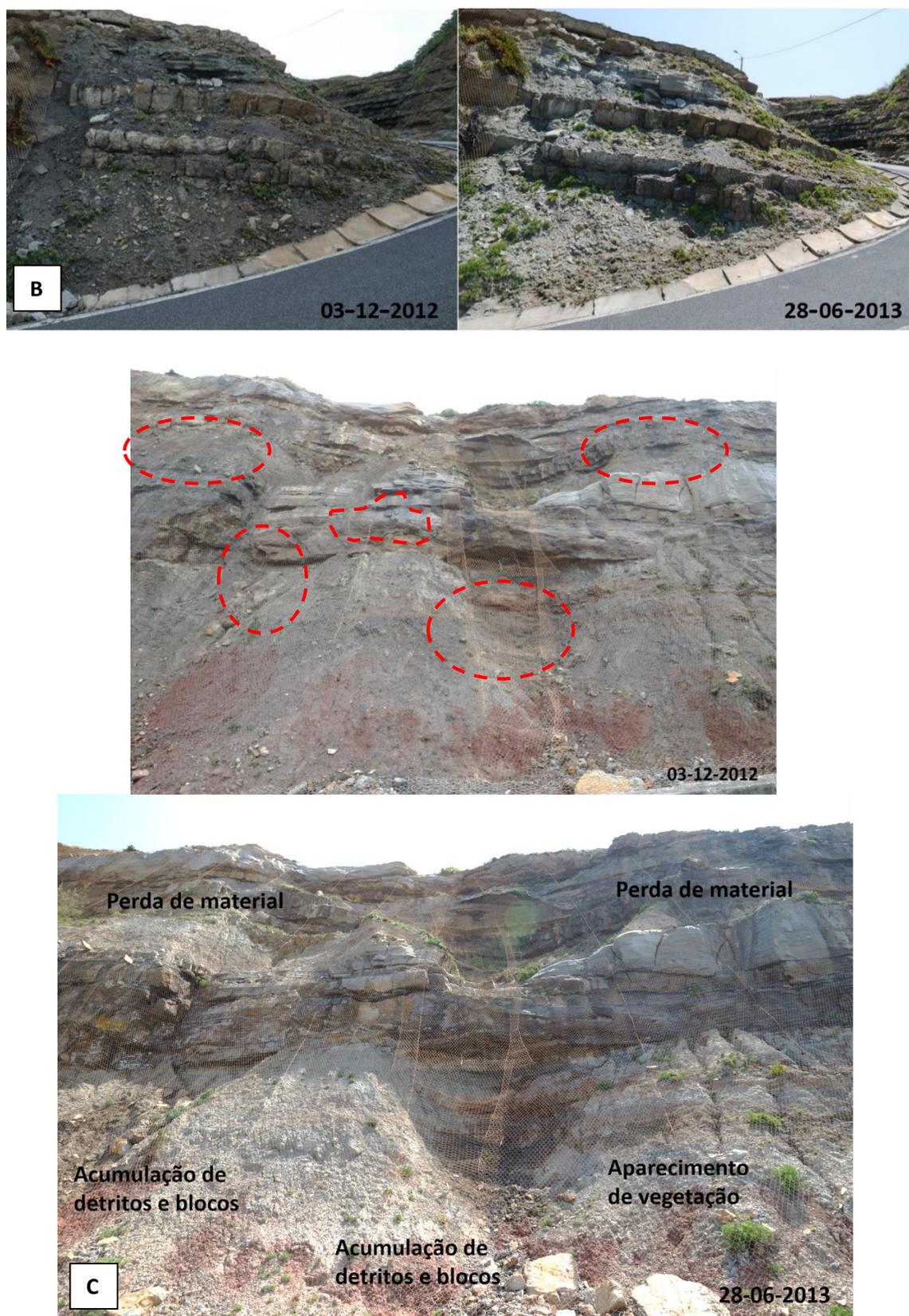


Figura 84 - Caso A: Alterações detetadas por diferença entre nuvens de pontos de duas épocas, confirmadas por comparação de imagens de levantamentos fotogramétricos realizados; Caso B: Na zona superior da estrada de acesso ao parque de estacionamento não foram detetadas diferenças na comparação entre nuvens de pontos e as imagens de levantamentos fotogramétricos realizados confirmam a inexistência de alterações entre as duas épocas. Caso C: Situação mais complexa de perda de material e acumulação de detritos na base, com aparecimento de vegetação entre as duas épocas de observação.

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

Usando o algoritmo M3C2 como base de cálculo das diferenças entre duas nuvens, as zonas de alteração correspondem às detetadas pelo algoritmo C2C mas, neste caso, são calculados valores de diferenças relativas. Esta informação torna-se bastante interessante pois permite calcular não só o volume total de material deslocado mas também diferenciar entre a perda ou ganho de material pela atribuição do sinal positivo ou negativo (Figura 86 e Figura 87).

Foi realizado o mesmo exercício de comparação de nuvens obtidas por *laser scanner*, entre 2012 e 2013, para os sectores de arriba Sul (Figura 85) e Norte (Figura 88).

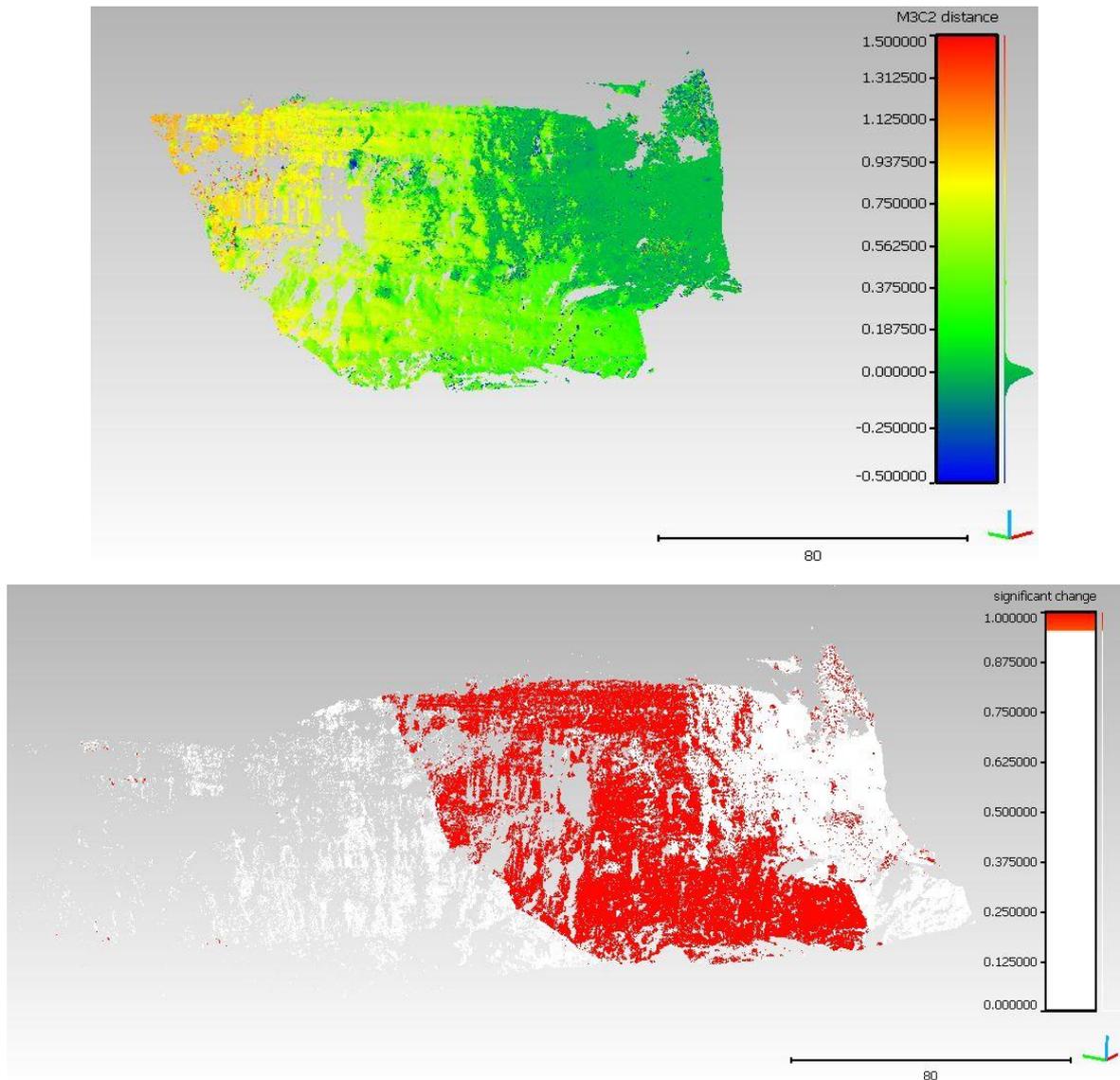


Figura 85 – Em cima: nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 na arriba Norte da praia do Porto da Calada; em baixo: nuvem de pontos classificada de acordo com a distância significativa (a vermelho -superior a 95% de confiança).

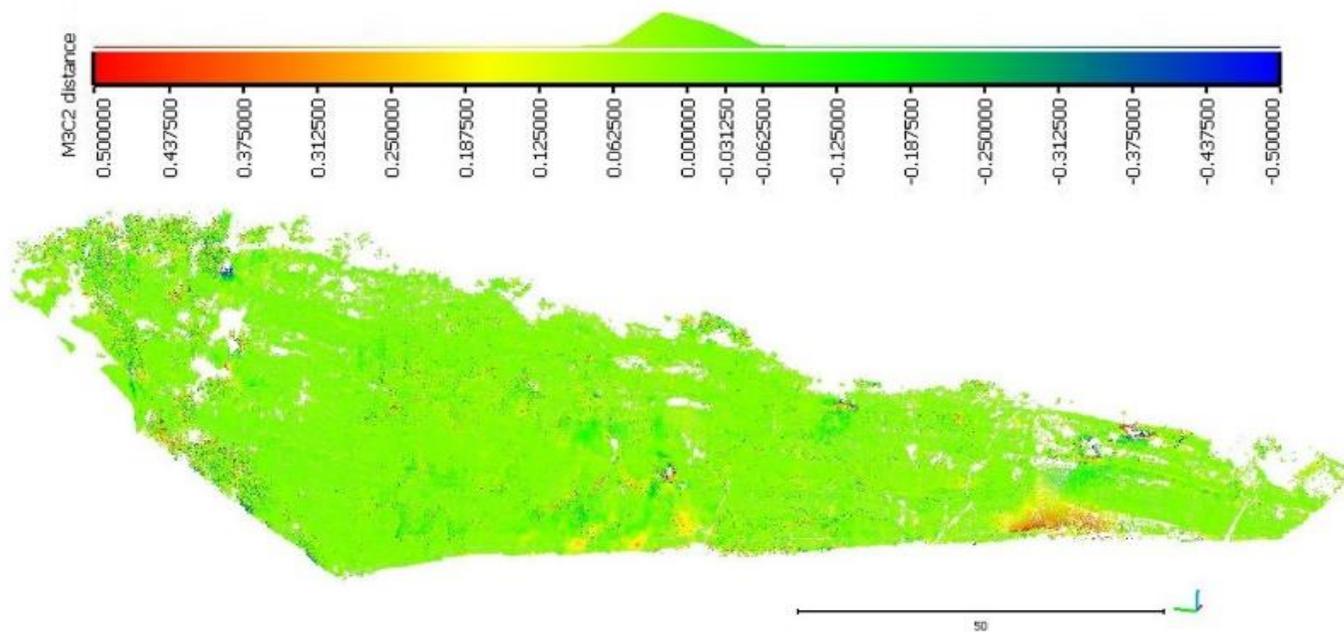


Figura 86 - Nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 no talude de acesso à praia do Porto da Calada.

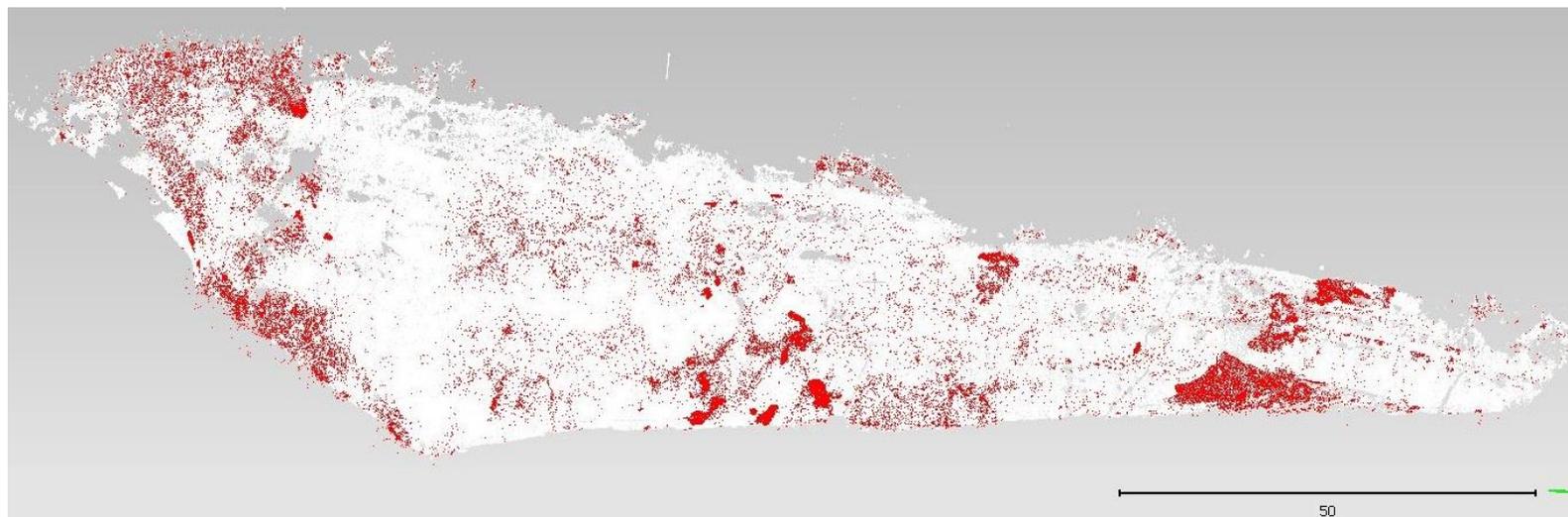


Figura 87 - Nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa (a vermelho-superior a 95% de confiança).

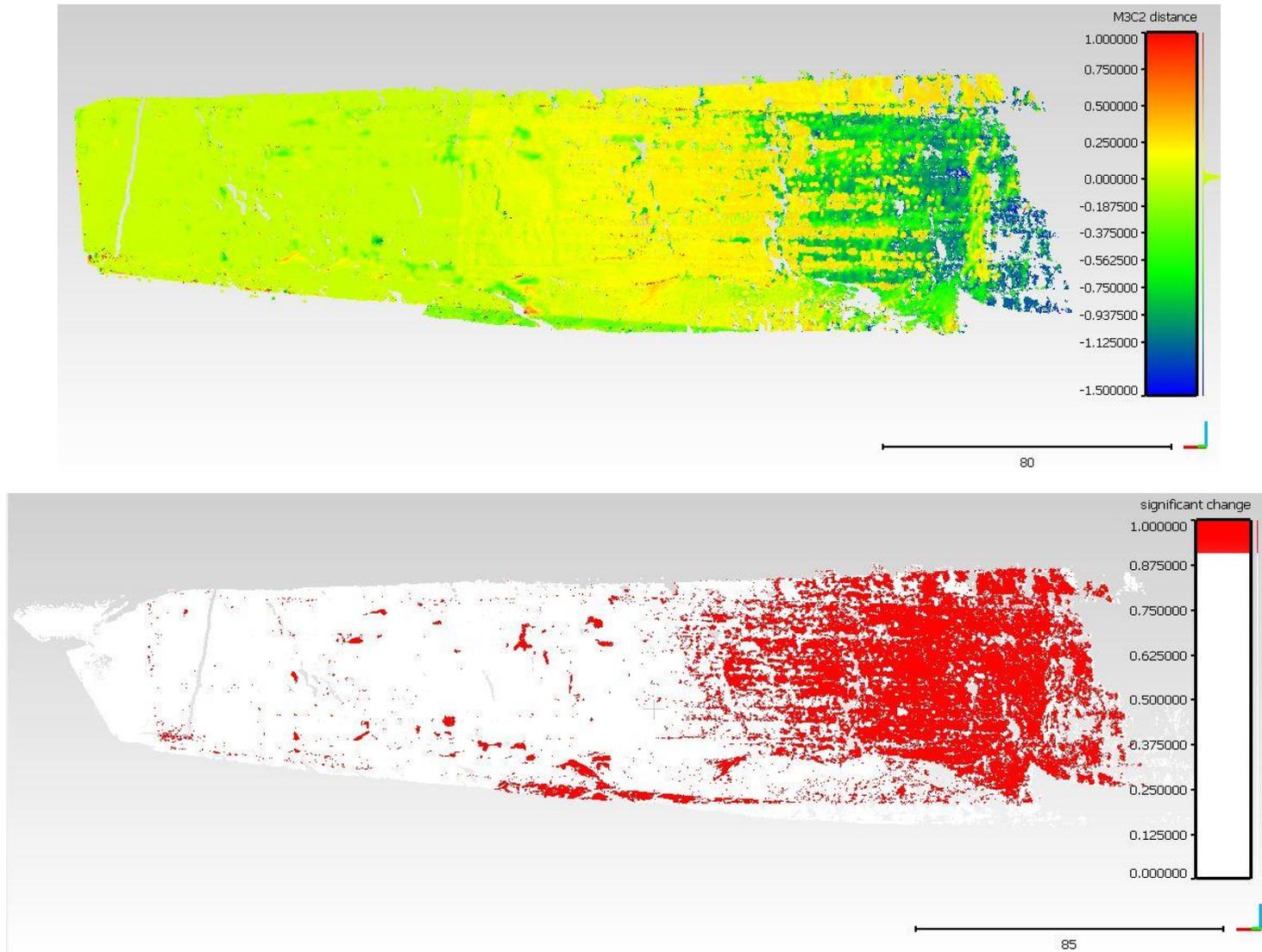


Figura 88 – Em cima: nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 na arriba Norte da praia do Porto da Calada; em baixo: nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa (a vermelho-superior a 95% de confiança).

5.1.3.3 Praia de São Bernardino

A praia de São Bernardino localiza-se no concelho da Lourinhã, na localidade de S. Bernardino, local de características turísticas ou de segunda habitação bem marcadas, havendo um acréscimo de população no período balnear. Trata-se de uma praia muito frequentada na época balnear, embora não possua um areal muito extenso.

Apesar da ausência de estruturas ou atividade antrópica no talude de acesso à praia, existe alguma pressão urbanística a Sul, onde se localiza um miradouro. A estrada de acesso à praia é pedonal e rodoviária, tornando-se exclusivamente pedonal a partir do apoio de praia (Figura 89).

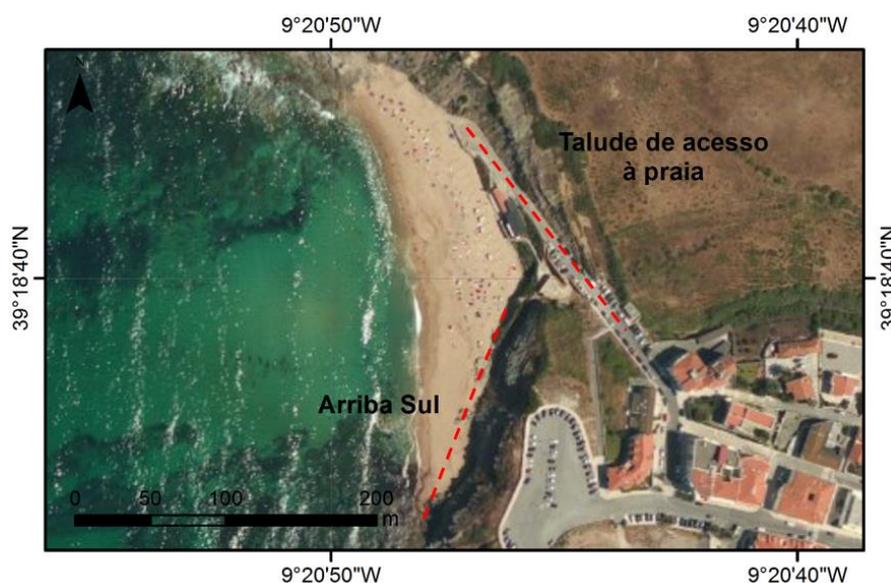


Figura 89 – Enquadramento geográfico das arribas da praia de São Bernardino (fonte de imagem: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community).

Do ponto de vista geológico, as arribas da praia de S. Bernardino datam do Jurássico Superior, respeitantes à Formação de Alcobaça (J3Al), de idade compreendida entre os 157-152 Ma (Kimmeridgiano), que é constituída, caracteristicamente, por alternâncias de arenitos e siltes argilosos, margas areníticas e calcários arenosos, progredindo para materiais exclusivamente carbonatados a norte (Marques *et al.*, 2013) (Figura 90).

No topo da arriba a zona é aplanada, dominada por vegetação rasteira e recortada por linhas de água permanentes e intermitentes que se prolongam pela face da arriba até ao sopé.

Como resultado da acumulação de detritos, a face da arriba é inclinada e ligeiramente convexa, sendo o seu declive perturbado por bancadas areníticas salientes, em consola, como resultado do recuo das camadas subjacentes, menos competentes. Esta alternância sucessiva entre camadas margosas, mais brandas, e camadas areníticas, mais resistentes, potencia movimentos de massa de vertente. O declive que a face da arriba apresenta facilita escorrência superficial, dando origem a ravinamento bastante intenso e zonas de densa vegetação. Toda a face da arriba, à exceção das bancadas mais salientes e das bancadas areníticas do topo, é coberta por aterros e depósitos de vertente (Figura 91).

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

De acordo com o inventário de instabilidades de vertente realizado por fotointerpretação de fotografia aérea, entre as datas de 1947 e 2000, foram detetados 4 movimentos de diferentes dimensões, que provocaram recuos entre 2 e 7 m, correspondendo a áreas perdidas no topo da crista de 19 a 145 m² em sectores de crista de comprimentos entre os 17 e os 51 m (Marques *et al.*, 2013).

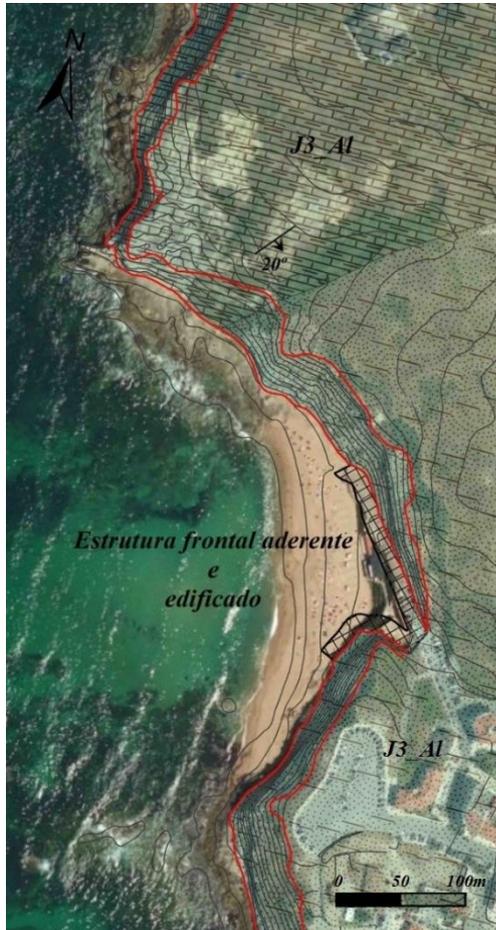


Figura 90 – Caracterização geológica das arribas da zona de São Bernardino: Formação de Alcobaça (J₃Al) (fonte Marques *et al.*, 2013)



Figura 91 – Aspeto das arribas da praia de São Bernardino: arriba ativa (em cima) e talude de acesso ao areal (em baixo).

Marques (1997) estima, por defeito, uma taxa de recuo médio para estas arribas de 0.01 m/ano. Nesse período de análise ocorreram pequenos movimentos no troço de arribas em estudo não mensuráveis nas fotos aéreas.

➤ Resultados da evolução das arribas entre Outubro de 2012 e Março de 2014

O segmento desta vertente de cerca de 100 m de comprimento foi monitorizado apenas por fotogrametria terrestre, requerendo a obtenção de imagens de eixos paralelos e algumas fotos convergentes para modelar com precisão as irregularidades da face, usando uma relação base/distância pequena, adequada a este tipo de relevo.

O primeiro levantamento foi realizado para estabelecer a situação de referência - Época 0 -, a 23/10/2012, onde foram obtidas para o segmento de talude da estrada e segmento Sul, um total de 91 imagens. Foram coordenados no terreno 33 pontos fotogramétricos naturais.

No dia 30/11/2012 ocorreu uma significativa queda de blocos na via pedonal de acesso à praia, pelo que a segunda campanha - Época 1 - teve lugar cerca de um mês após o estabelecimento da Época 0 (Figura 92). No que respeita o segmento do talude de acesso à praia e em particular para o estudo realizado na zona onde ocorreram movimentos, foi utilizado um total de 18 imagens obtidas no primeiro levantamento. O ajustamento relativo das imagens resultou num erro total de 0.56, e o bloco foi georreferenciado com recurso a 4 pontos fotogramétricos distribuídos pelas 18 imagens obtendo-se um desvio nos pontos fotogramétricos de 0.03 m.

Do segundo levantamento, foram usadas 37 imagens para o processamento, obtendo-se um *sigma naught* final para orientação relativa de 0.62 e o bloco de imagens foi georreferenciado com recurso a 6 pontos fotogramétricos apresentando uma precisão de 0.05 m.

Tendo ambos os conjuntos orientados, foi obtida por correlação de imagem uma nuvem de pontos para cada época (Figura 93).

Na fase de correlação de imagem para a geração de nuvens de pontos, foi necessário utilizar ferramentas de segmentação das imagens onde diferentes parâmetros do processo de correlação iam sendo testados. Desta forma, foi possível obter-se duas nuvens de pontos densas, usando diferentes configurações para a correlação (densidade de pontos, profundidade de pesquisa da superfície de projeção de pontos, textura, etc.), a fim de preencher lacunas devidas a perspectivas menos favoráveis e bases fotográficas que, apesar de teoricamente bem planeadas, dificultaram o processo de geração de nuvens de pontos. A diferença no número de pontos de cada nuvem prende-se com estas diferenças nos parâmetros iniciais, que influenciam a resolução espacial, e também com o facto de a nuvem do segundo levantamento corresponder a uma zona mais abrangente.

As duas nuvens de pontos foram comparadas no sector onde o movimento de massa ocorreu para testar a sensibilidade do método e para avaliar as mudanças.

As diferenças de profundidade detetadas automaticamente entre a situação antes e depois variam de insignificantes, aquelas devidas às mudanças naturais em pequenas formas de relevo e vegetação, até cerca de 1.4 m, onde o bloco rochoso foi totalmente separado da encosta (Figura 94). Estes resultados foram obtidos aplicando o algoritmo M3C2.

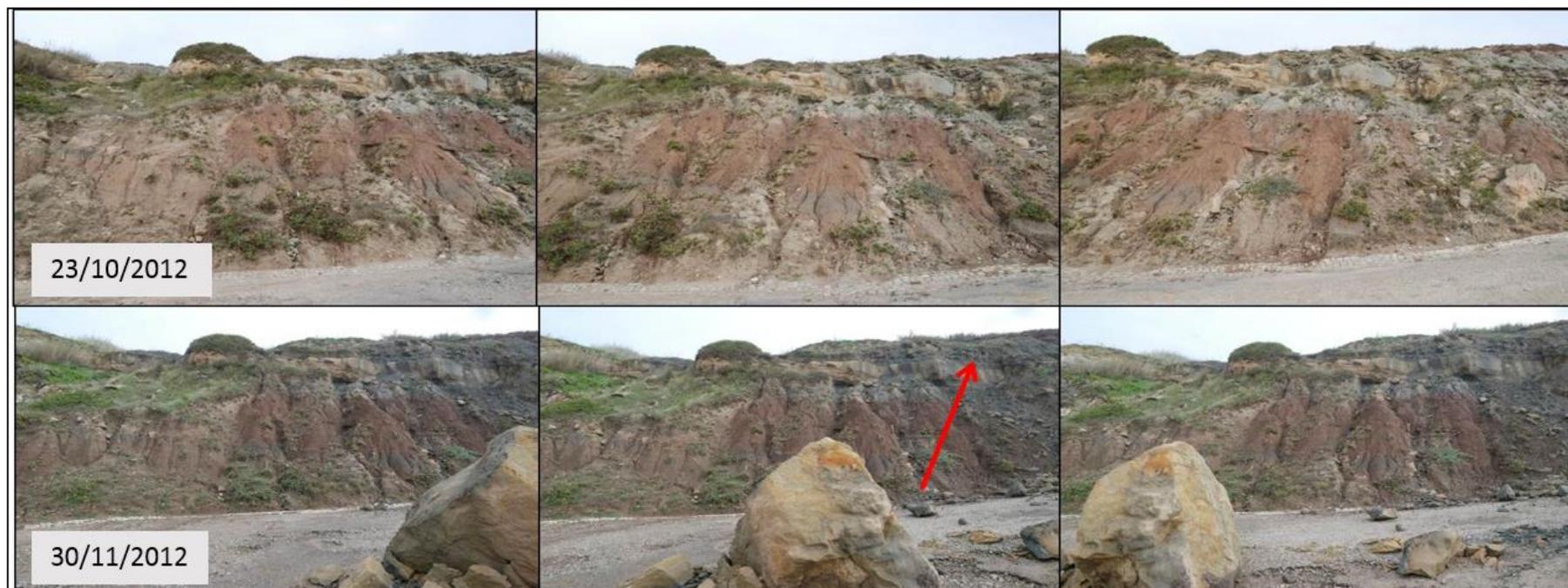


Figura 92 - Captura de imagens antes e depois da queda de blocos. A seta assinala a zona de onde a massa foi deslocada.

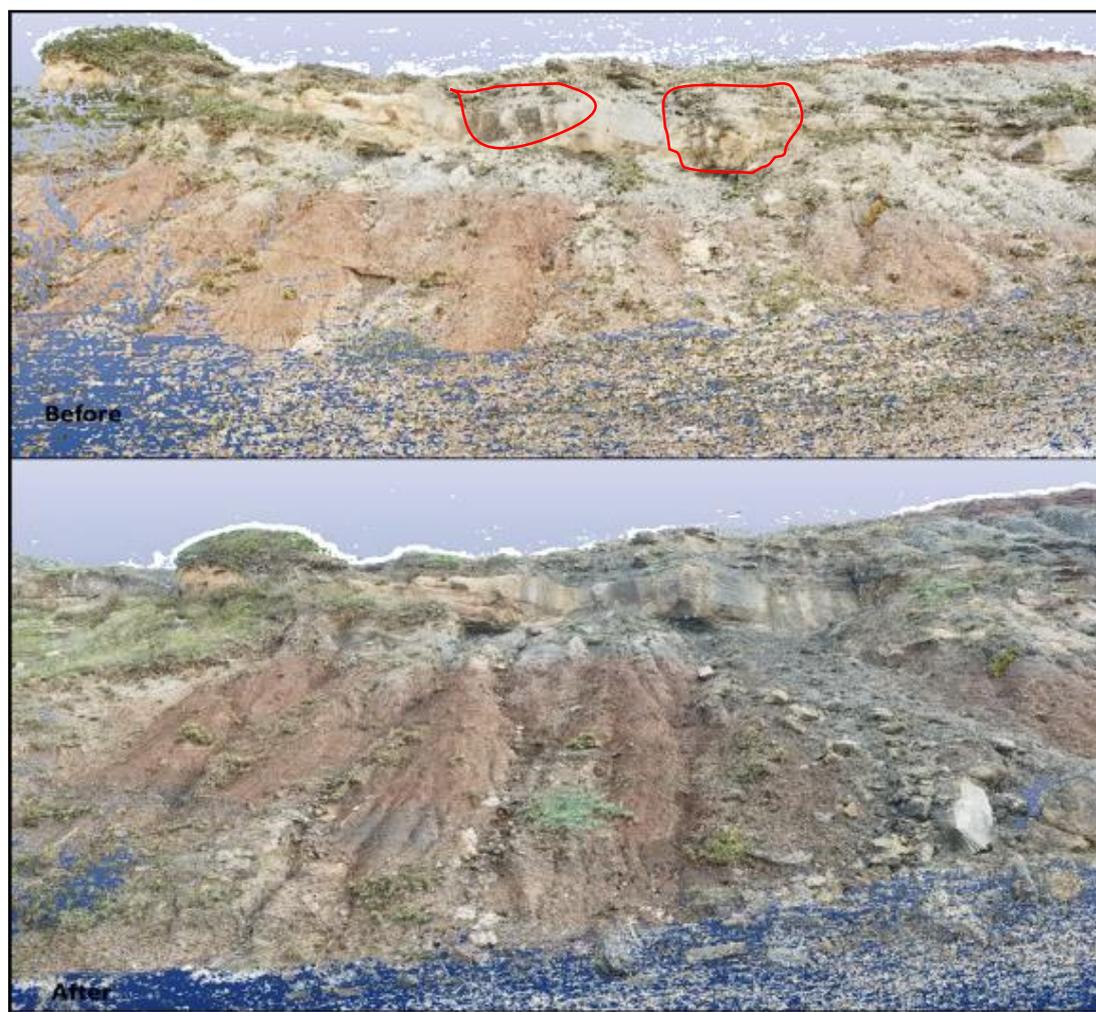


Figura 93 – Nuvens de pontos antes e depois da queda de blocos ocorrida no talude monitorizado.

A partir da nuvem das diferenças é possível não só detetar grandes alterações na face da arriba, como no presente caso provocada pela queda de um bloco, como também detetar o rasto de materiais removidos por arrastamento, a acumulação de materiais na base e outros fenómenos como a evolução de regueiros.

Aquando da disponibilização do algoritmo M3C2, o exercício foi repetido e os resultados, bastante mais completos em termos de informação significativa relativa à cicatriz do bloco e ao rasto deixado pelo seu rolamento, permitiram determinar os volumes envolvidos de forma muito mais consistente e para todo o talude afetado pelo movimento.

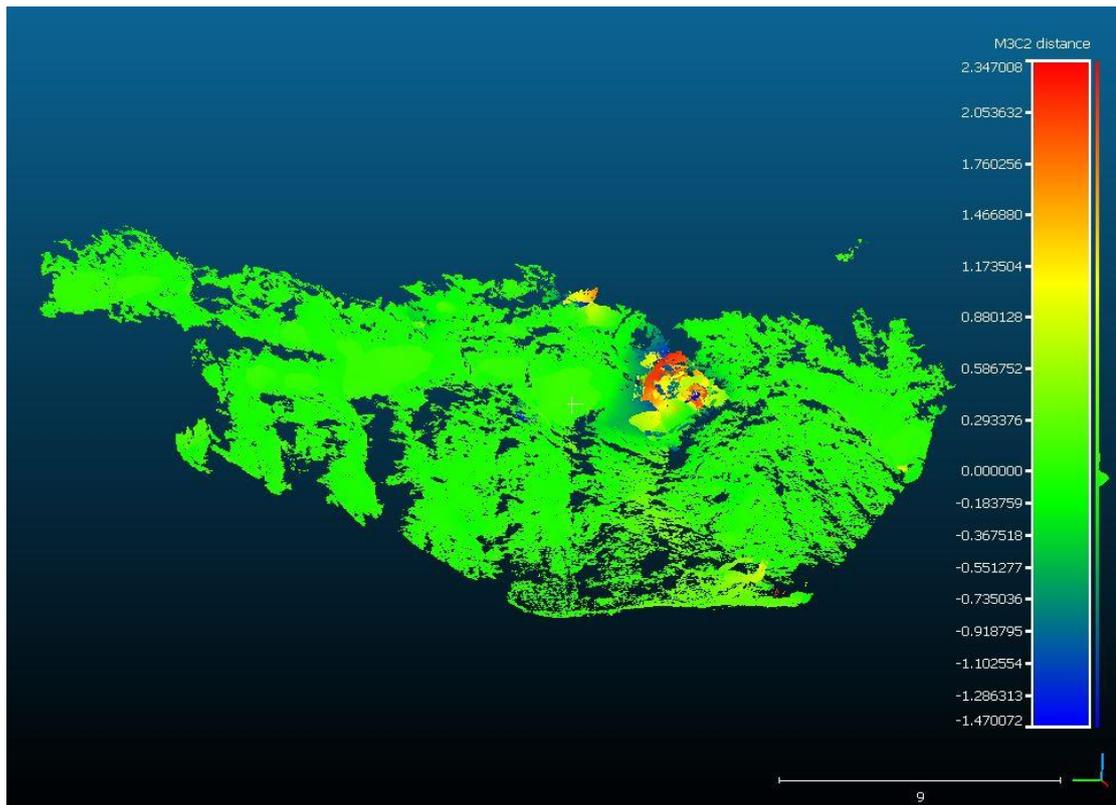


Figura 94 - Nuvem de pontos de diferenças calculadas por M3C2 no talude da praia de São Bernardino.

As nuvens originais, ainda que limpas de *outliers* e segmentadas para a região de interesse, não puderam ser utilizadas como fonte para a determinação dos volumes devido às suas dimensões, tendo a nuvem de pontos sido decimada para um espaçamento mínimo entre pontos de 0.03 m, resultando numa nuvem de cerca de 236 mil pontos. Foi calculado com o programa VOLTERRE um volume de material perdido de $17.51 \pm 1.7 \text{ m}^3$.

Um terceiro levantamento foi realizado a 18/03/2014, mais uma vez por ocorrência de uma queda de blocos no mesmo talude de acesso à praia a 2/02/2014, obtendo-se uma terceira época de observação, Época 2.

Neste movimento, foram deslocados dois blocos de grandes dimensões. No mesmo talude, foram processadas 53 imagens obtidas neste levantamento. O erro total do ajustamento foi de 0.59 e a precisão da georreferenciação, com recurso a 6 pontos fotogramétricos, foi de 0.05 m.

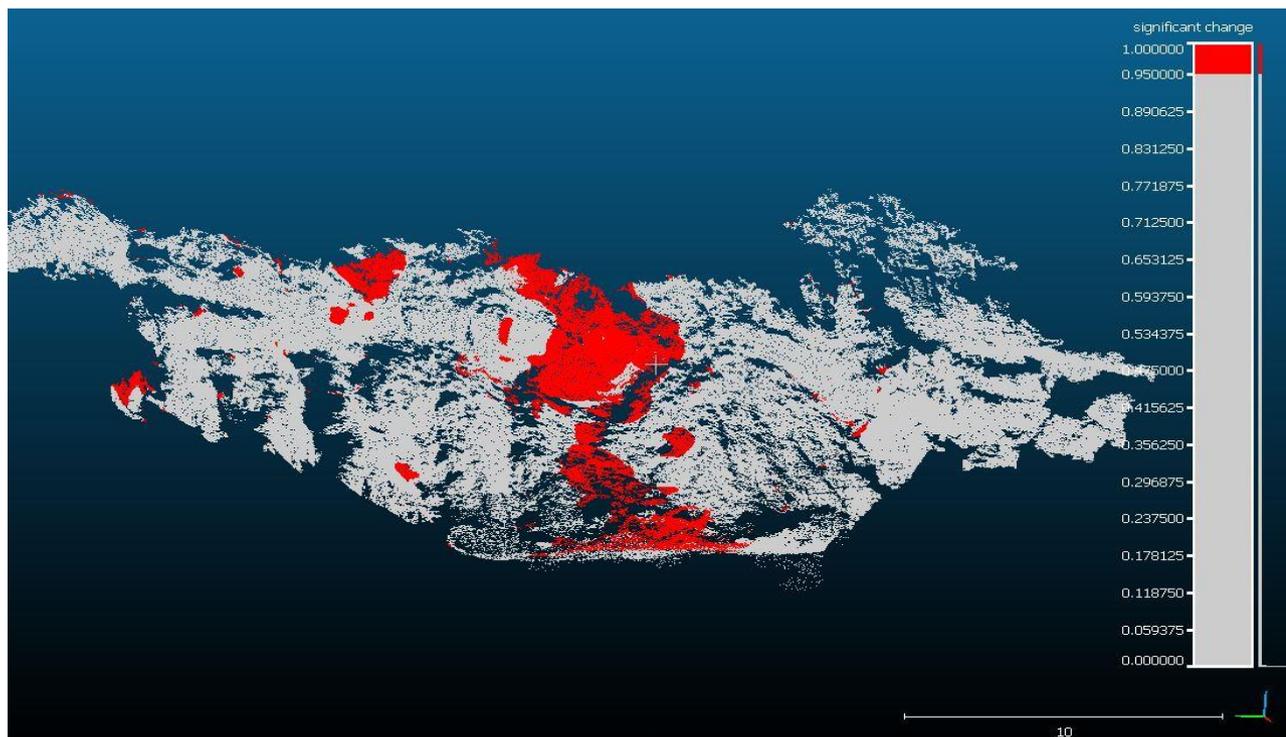


Figura 95 - nuvem de pontos classificada de acordo com a distância considerada significativa (a vermelho-superior a 95% de confiança).

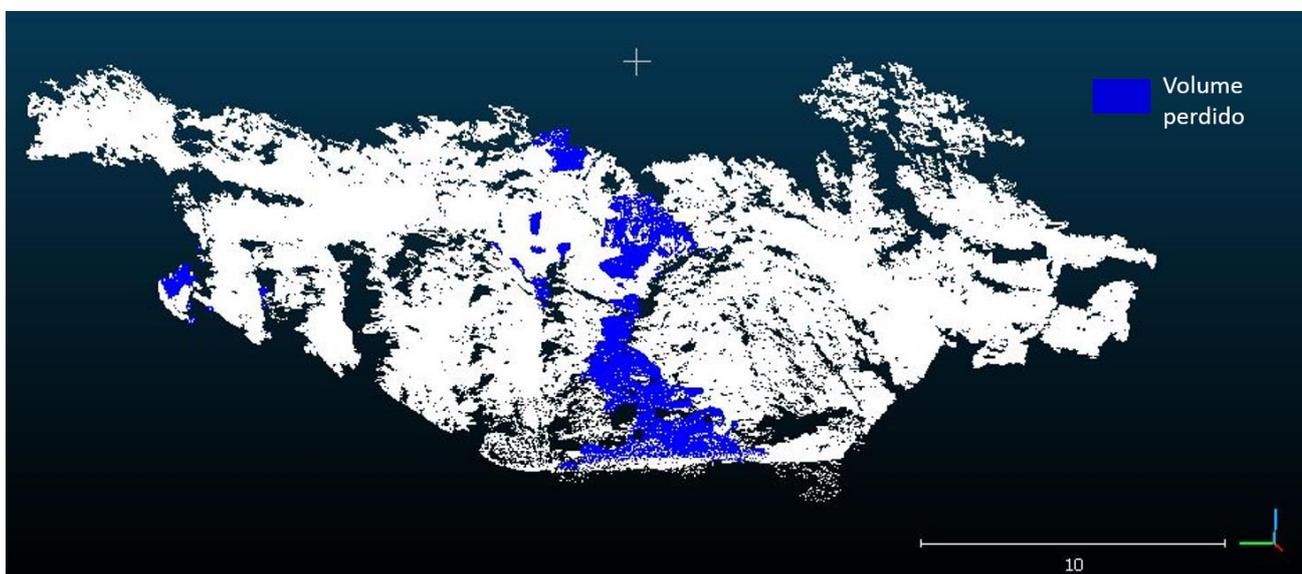


Figura 96 – Nuvem de diferenças, sem classificação atribuída, com os clusters de material perdido assinalados a azul.

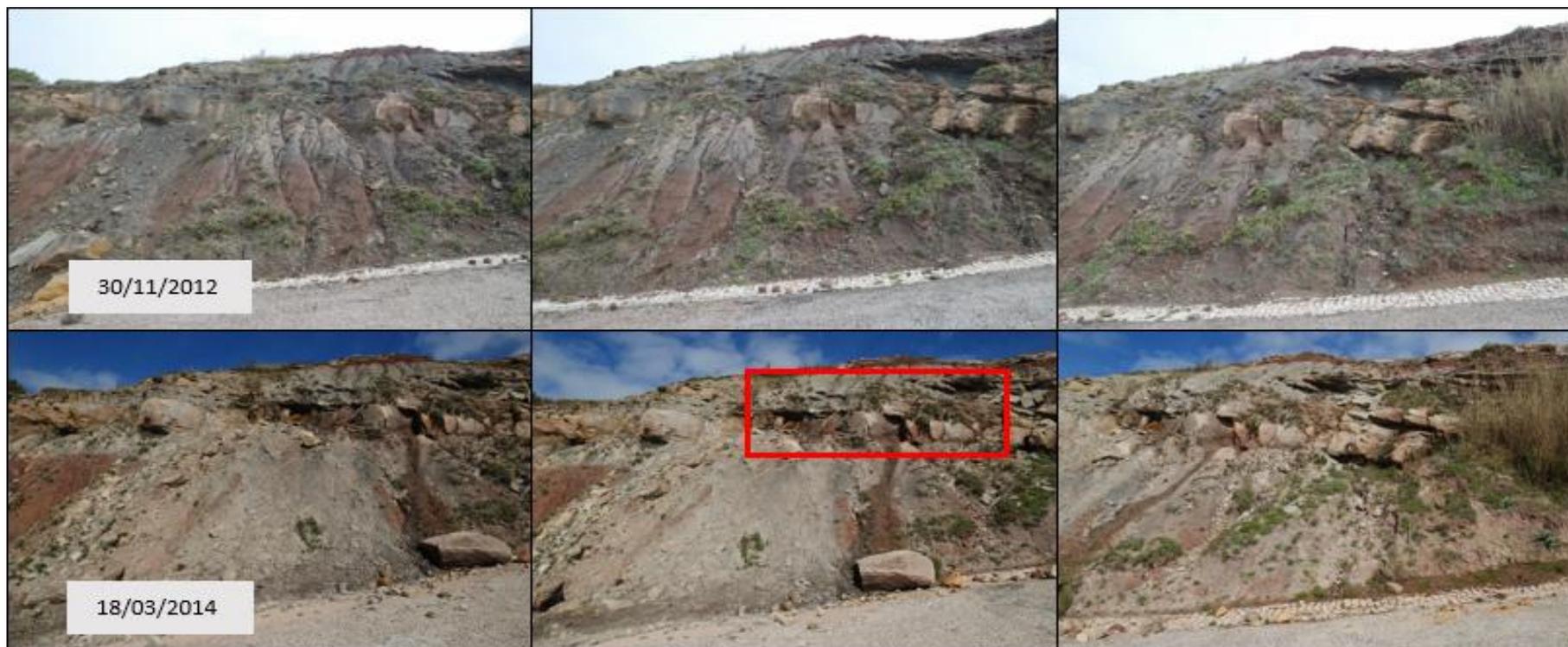


Figura 97 – Sequência de imagens do levantamento fotogramétrico representativa da alteração ocorrida entre duas épocas de observação.

A nuvem de pontos gerada para o sector onde ocorreram as quedas de blocos, representado pelas imagens na Figura 97, é composta por cerca de 12.8 milhões de pontos com RGB associado (Figura 98).

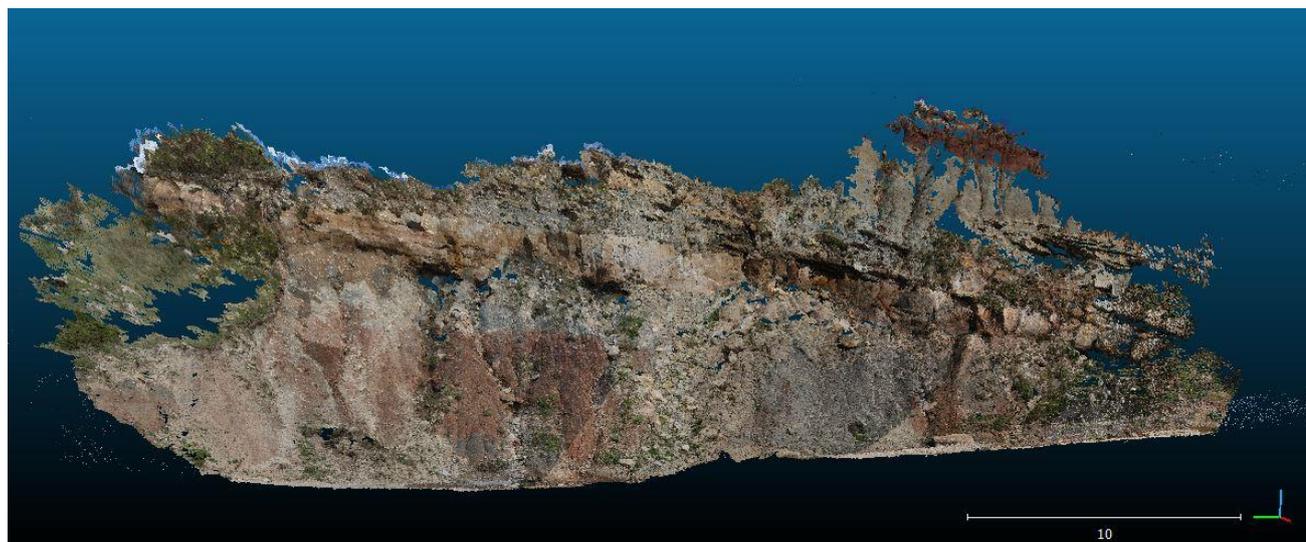


Figura 98 – Nuvem de pontos tridimensional com textura fotográfica, a ser alvo de deteção e análise de alterações.

Foi calculada a nuvem de diferenças através do algoritmo M3C2, tendo-se registado perdas e ganhos de material de valores num intervalo entre cerca de - 1.7m e 2.3m.

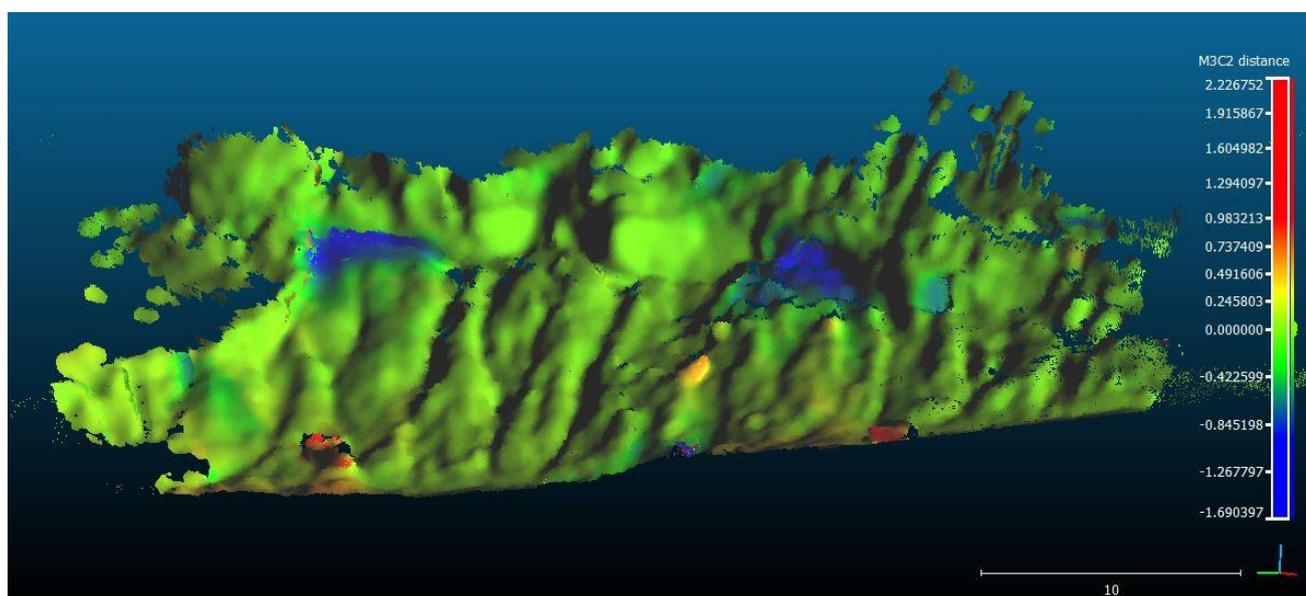


Figura 99 – Nuvem de diferenças calculada com as nuvens de pontos representativas das duas épocas de observação 1 e 2 (30/11/2012 e 18/03/2014).

As regiões de determinação das diferenças com confiança superior a 95% são as registadas na Figura 100 e sobre as quais são determinados os volumes deslocados no evento.

Pelos motivos já referidos, a nuvem original de 12.8 milhões de pontos foi decimada segundo um critério de espaçamento mínimo entre pontos de 0.05 m, resultando numa nuvem de cerca de 338 mil pontos.

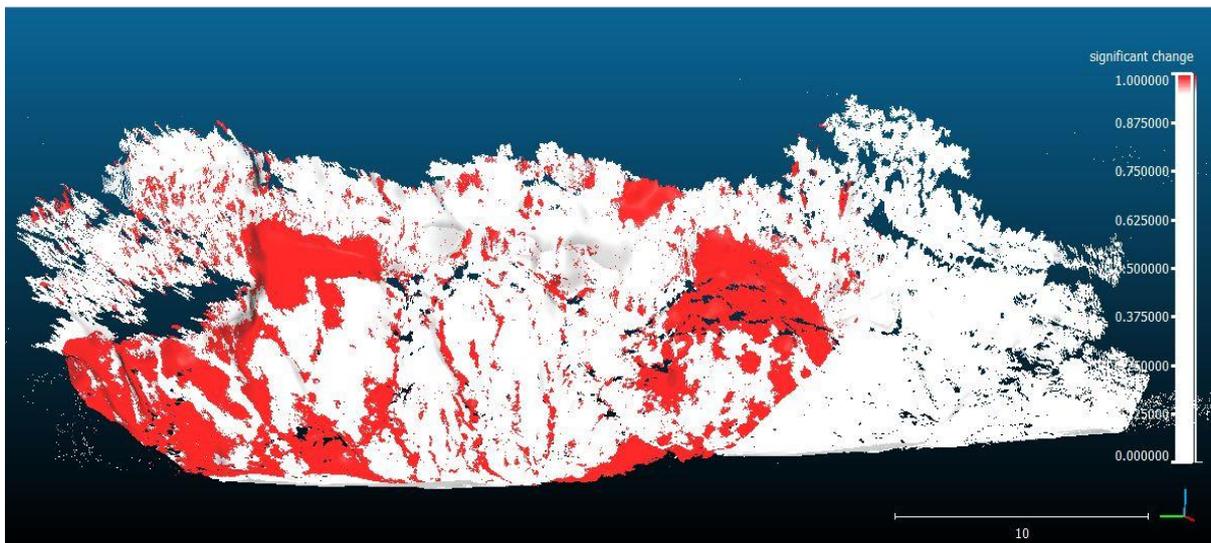


Figura 100 – Nuvem de diferenças classificada de acordo com a significância do cálculo de distâncias (a vermelho, superior a 95%).

A sobreposição na nuvem original dos *clusters* de pontos onde se registaram alterações permite verificar que as bancadas mais resistentes foram as que mais contribuíram para a perda de volume na face da arriba através da queda de blocos de dimensões significativas (Figura 101). Estes blocos foram responsáveis pelo arrastamento de material rochoso e dispersão de blocos de menores dimensões resultantes da desagregação dos blocos maciços.

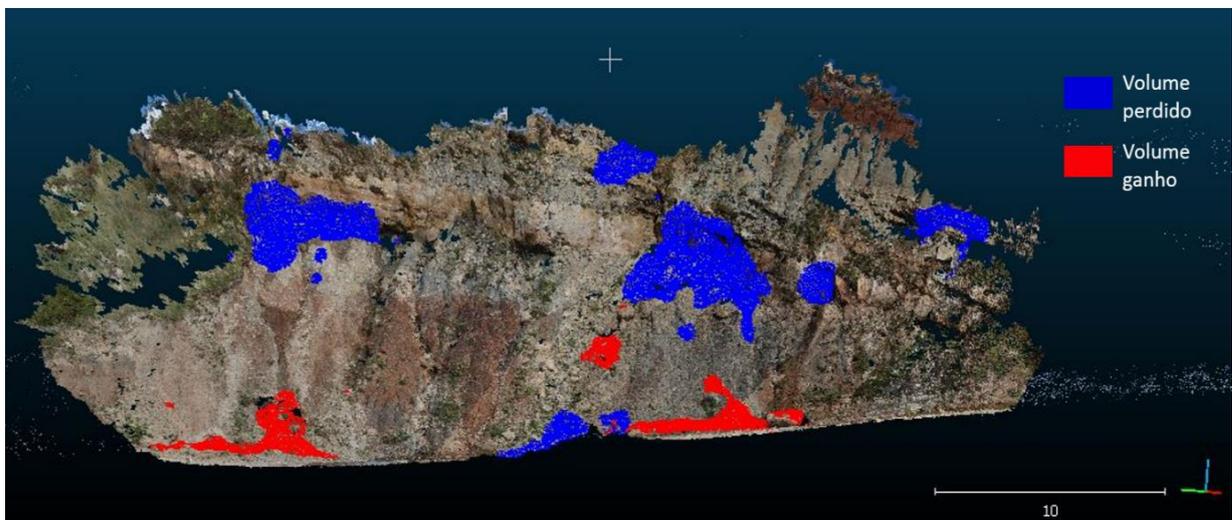


Figura 101 – Nuvem de pontos original com os clusters de volume perdido e acumulado, como calculado pelo programa VOLTERRE.

O cálculo de volumes foi realizado usando o programa VOLTERRE, que determinou um total de $24.95 \pm 2.5 \text{ m}^3$ de material perdido e $9.66 \pm 0.9 \text{ m}^3$ de material depositado.

5.2 Inventariação de movimentos

Para se poder compreender convenientemente o comportamento do litoral no que concerne a ocorrência de movimentos em arribas costeiras, é necessário construir inventários sistemáticos de movimentos. Estes inventários são tão mais relevantes quanto maior a qualidade e quantidade de dados caracterizadores dos movimentos ocorridos.

Exemplifica-se de seguida o processo de inventariação de movimentos numa arriba realizado inteiramente com base em informação 3D.

Utilizando como caso de estudo a praia do Porto da Calada, procedeu-se à individualização de movimentos ocorridos ao longo das épocas de observação já referidas, à sua caracterização morfométrica e contexto geológico, e utilizando o programa VOLTERRE, ao cálculo de volumes perdidos e acumulados nos 4 sectores de arriba da praia do Porto da Calada, tendo sido a zona Norte e Centro posteriormente tratadas conjuntamente (ver Figura 77, página 95).

A cartografia de volume ganho e perdido ao longo das secções da praia é apresentada nas figuras que se apresentam nas próximas páginas, tendo os cálculos numéricos sido realizados pelo método desenvolvido neste trabalho.

É importante salientar a fraca qualidade dos dados nos extremos das nuvens de pontos obtidas pelo *laser scanner*, especialmente a zona mais a Norte da arriba Norte e o extremo Oeste da arriba Sul (Figura 102):

- A morfologia da praia dificultou a obtenção de dados pela difícil escolha das posições do *laser scanner* relativamente às faces das arribas a cobrir. Ao analisar a nuvem final, ambas as posições (P3 e P5) se mostraram demasiado oblíquas à orientação das faces das arribas norte e sul, exceto nos seus limites interiores e na região do talude central. Embora a aquisição de pontos a partir do ponto P5 tenha sido realizada mais ortogonalmente à face da arriba sul, a distância que se teve de manter devido à ausência de uma plataforma estável mais avançada na areia e devido também à elevada altura da arriba (cerca de 84m) vs. FOV, resultaram numa franca diminuição da intensidade do sinal de retorno com o avanço para Oeste e, conseqüentemente, numa menor densidade dos pontos. A arriba Norte, “varrida” também de um ponto de vista demasiado oblíquo, demonstra várias lacunas (zonas de oclusão) causadas pela irregularidade vertical e horizontal da face da arriba e pela significativa escorrência de água ao longo da face, factos que originam níveis mais salientes e ravinamento que, do ponto de vista do *laser scanner*, bloqueiam a obtenção de dados por oclusão de zonas vizinhas. A região mais a norte já não apresenta qualidade suficiente para poder ser utilizada.

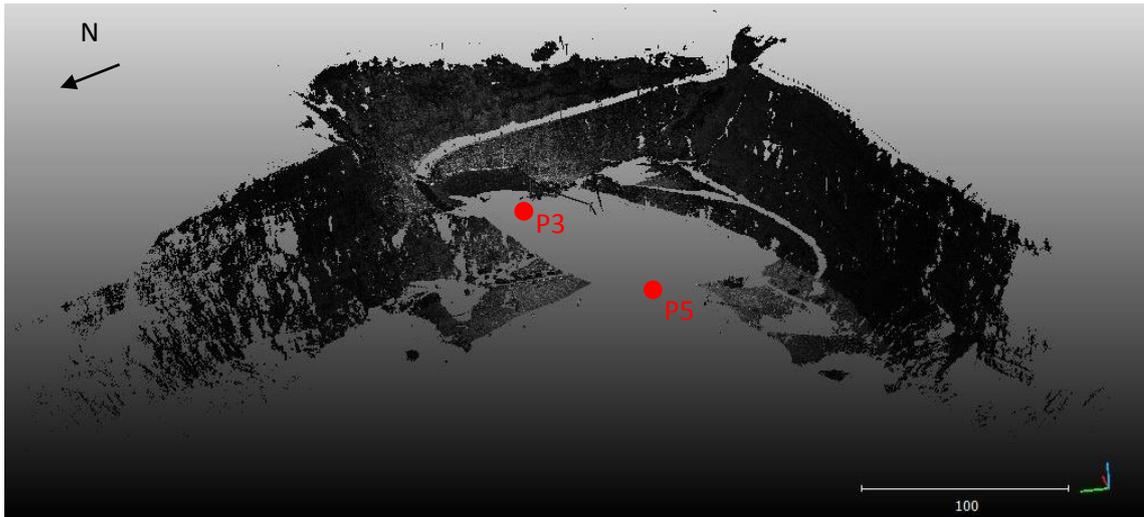


Figura 102 – Levantamento total da Praia da Calada: nuvens classificadas de acordo com a intensidade (tons de cinzento de claro para escuro, diminuição da intensidade de retorno de sinal).

Na arriba Norte, com a nuvem decimada a um afastamento de pontos de 15 cm, o valor total de material perdido calculado entre 2012 e 2013, foi de $291.06 \pm 29.1 \text{ m}^3$, distribuídos por 12 movimentos (Tabela 8, Figura 103 e Figura 104). Por motivos de incapacidade computacional, não foi possível contabilizar o volume de material acumulado na fase de determinação dos *clusters*.

Tabela 8 – Características dos movimentos (volumes perdidos) definidos por clusters na arriba Norte da praia do Porto da Calada.

Cluster	ID Cluster	Área Afetada (m ²)	Largura (m)	Altura (m)	Profundidade (m)	Volume (m ³)	Litologia afetada	Tipo de movimento
1	132	12.10	2.40	5.05	1.20	14.53	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
2	113	11.71	2.71	4.32	0.75	8.77	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento
3	114	24.11	3.67	6.57	1.41	34.03	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento
4	52	Movimento definido por mais que um cluster				24.49	Arenito argiloso	Queda de blocos/Tombamento
5	48	Movimento definido por mais que um cluster				17.48	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
6	100	Movimento definido por mais que um cluster				20.07	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento
7	43	Movimento definido por mais que um cluster				50.52	Arenito argiloso	Queda de blocos/Tombamento
8	169	10.19	1.72	5.92	0.72	7.31	Arenito argiloso	Queda de blocos/Tombamento
10	61	Movimento definido por mais que um cluster				34.76	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
11	46	Movimento definido por mais que um cluster				59.81	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
12	27	Movimento definido por mais que um cluster				19.29	Arenito	Queda de blocos/Tombamento

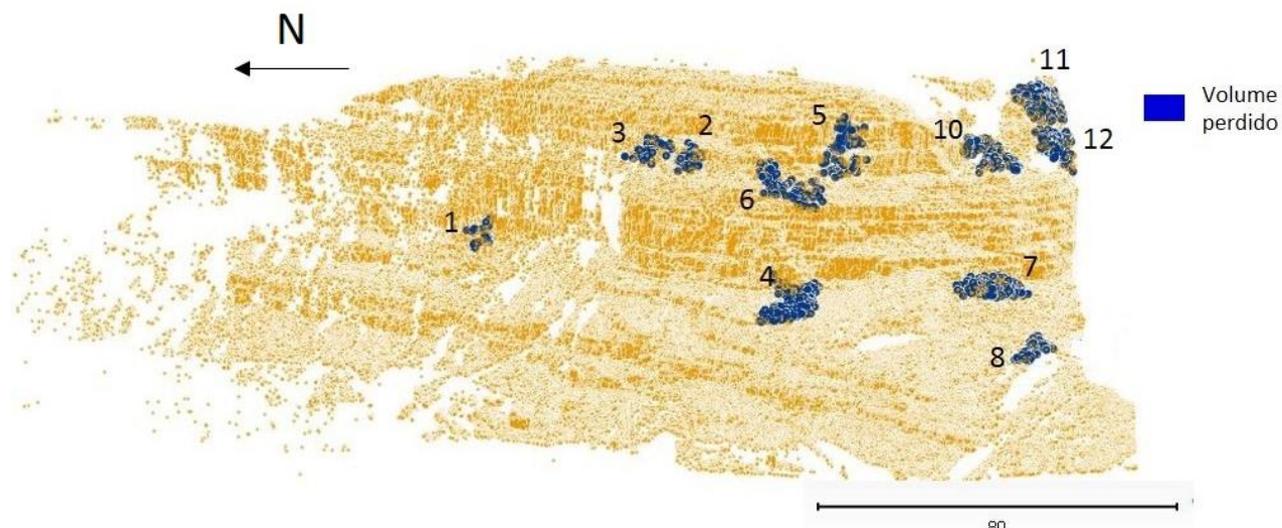


Figura 103 - Cartografia de volumes perdidos na arriba Norte da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013, com movimentos individualmente identificados e caracterizados (Tabela 8).

Na secção Leste da Praia do Porto da Calada – Talude da Estrada -, entre 2012 e 2013, a nuvem decimada a um afastamento entre pontos de 10 cm permitiu contabilizar um total de $355.02 \pm 3.5 \text{ m}^3$ perdido (Figura 105).

Foi realizada a identificação individual de cada movimento, num total de 28 movimentos (Tabela 9, Figura 106 e Figura 107). Os *clusters* identificados no extremo Norte desta secção foram ignorados para a contabilização de movimentos por representarem alterações de vegetação.



Figura 104 - Caracterização litológica da arriba Norte da praia do Porto da Calada.

Tabela 9 - Características dos movimentos (volumes perdidos) definidos por clusters no Talude da Estrada da praia do Porto da Calada

Cluster	ID Cluster	Área Afetada (m ²)	Largura (m)	Altura (m)	Profundidade (m)	Volume (m ³)	Litologia Afetada	Tipo de Movimento
1	318	5.64	1.85	3.06	0.87	4.88	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
2	67	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				11.28	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
3	295	5.05	0.79	6.35	1.99	10.04	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
4	308	4.97	1.48	3.36	1.83	9.09	Calc. Margoso	Queda de blocos/Tombamento
5	170	5.28	1.39	3.80	1.44	7.60	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
6	120	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				27.10	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
7	182	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				23.16	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
8	76	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				24.89	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
9	208	5.74	1.33	4.30	0.61	3.48	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
10	322	4.75	1.17	4.07	1.01	4.79	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
11	66	5.38	1.22	4.39	0.73	3.92	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
12	20	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				33.09	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
13	161	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				23.65	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
14	69	5.48	1.74	3.14	0.72	3.92	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
15	290	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				12.70	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
16	203	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				25.98	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
17	126	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				35.64	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
18	137	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				14.39	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
19	80	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				12.94	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
20	260	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				11.93	Argilito	Queda de blocos/Tombamento
21	125	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				3.92	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
22	206	9.56	2.29	4.17	0.79	7.52	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
23	343	9.07	2.47	3.67	1.02	9.23	Calc. margoso	Queda de blocos/Tombamento
24	96	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				9.42	Arenito	Queda de blocos/Tombamento
25	164	2.29	0.70	3.26	1.95	4.48	Margas	Queda de blocos/Tombamento
26	189	11.25	2.36	4.77	0.58	6.56	Calc. margoso	Queda de blocos/Tombamento
27	96	Movimento definido por mais que um <i>cluster</i>				9.42	Calc. margoso	Queda de blocos/Tombamento

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

As nuvens representativas da arriba Sul tiveram, de igual modo, de ser decimadas e a resolução utilizada no cálculo de volumes foi de 15 cm. O volume de material perdido calculado para toda a nuvem não corresponderá ao volume efetivamente perdido em movimentos, uma vez que a qualidade das nuvens originais se degrada muito para Oeste com a crescente obliquidade de incidência dos feixes laser na face da arriba (Figura 108). Como consequência, a nuvem de diferenças encontra-se muito rarefeita e a determinação dos volumes nesse extremo já não deverá considerada para os cálculos de volumes.

Por este motivo, na arriba Sul, apenas foram contabilizados os movimentos que se encontram assinalados na Figura 109, totalizando um volume de material perdido de $216.50 \pm 21.6 \text{ m}^3$. Após análise das nuvens de ambas as épocas, e de acordo com a Tabela 10 e Figura 110, foram definidos 14 movimentos (volumes perdidos).

Tabela 10 - Características dos movimentos (volumes perdidos) definidos por clusters na arriba Sul da praia do Porto da Calada.

ID	Cluster	Área (m ²)	Largura (m)	Altura (m)	Profundidade (m)	Volume (m ³)	Litologia Afetada	Tipo de movimento	
1	465	9.66	1.53	6.29	1.03	3.65	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento	
2	498	6.19	1.18	5.25	0.87	2.04	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento	
3	298	18.35	2.79	6.59	1.28	10.39	Calcarenito Arenito	Queda de blocos/Tombamento	
4	182	33.91	4.63	7.32	0.58	19.59	Arenito	Queda de blocos/Tombamento	
5	470	24.89	3.71	6.71	0.67	14.29	Calcarenito Arenito	Queda de blocos/Tombamento	
6	170	18.06	3.12	5.80	1.56	23.08	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento	
7	106	11.73	2.45	4.78	0.67	10.21	Dep. vertente	Queda de blocos/Tombamento	
8	458	12.59	2.52	5.00	0.74	6.51	Dep. vertente	Queda de blocos/Tombamento	
9	227	15.58	2.30	6.77	0.57	10.49	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento	
10	64	12.94	2.42	5.35	0.87	13.31	Calcarenito	Queda de blocos/Tombamento	
11	292	8.87	0.98	9.08	0.61	6.58	Arenito	Queda de blocos/Tombamento	
12	485	27.34	3.92	6.97	0.52	27.04	Arenito	Queda de blocos/Tombamento	
13	391	20.47	3.12	6.56	0.38	17.71	Arenito Pelitos	Queda de blocos/Tombamento	
14	236	Movimento definido por mais que um cluster					51.63	Dep. vertente	Queda de blocos/Tombamento

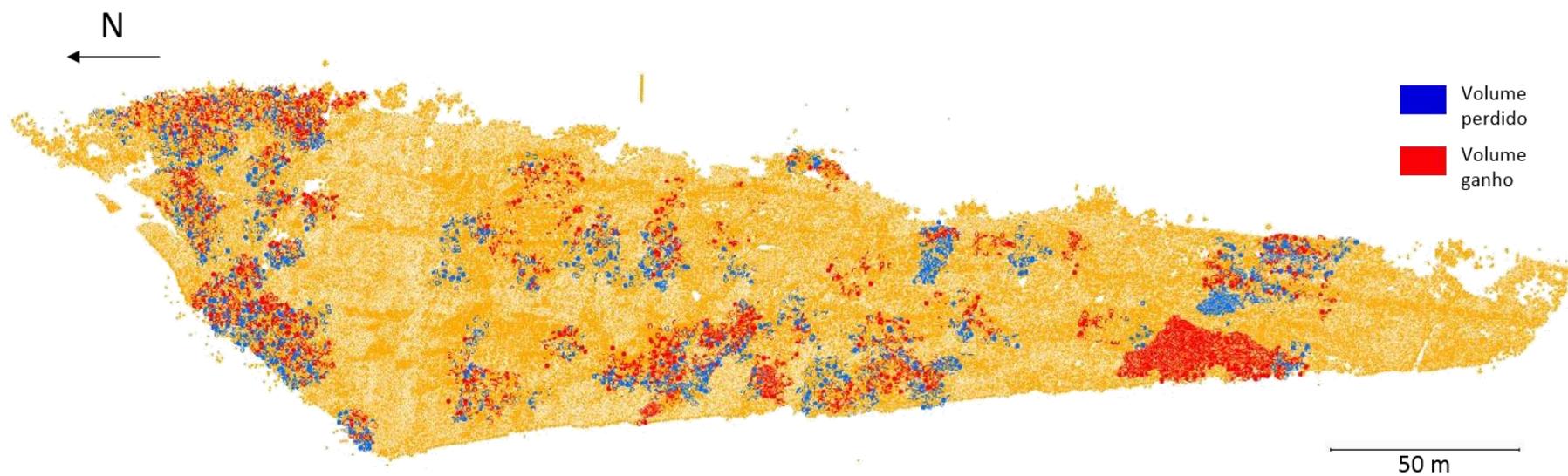


Figura 105 - Cartografia de volumes ganhos e perdidos na escarpa Leste - Talude da Estrada - da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013.

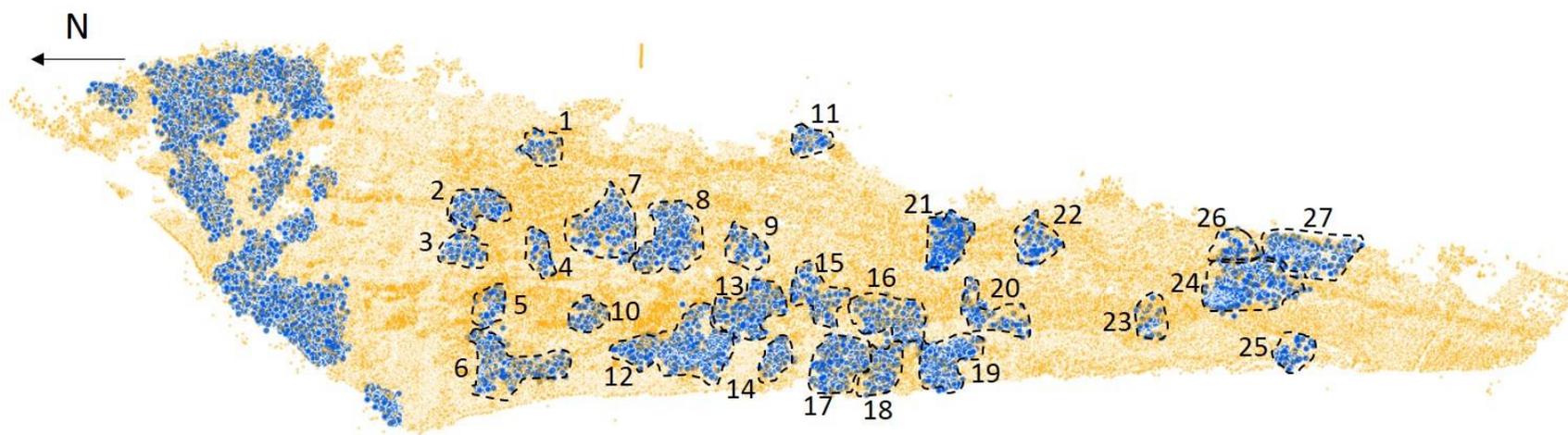


Figura 106 - Cartografia de volumes perdidos na escarpa Leste - Talude da Estrada - da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013, com movimentos individualmente identificados e caracterizados (Tabela 9).

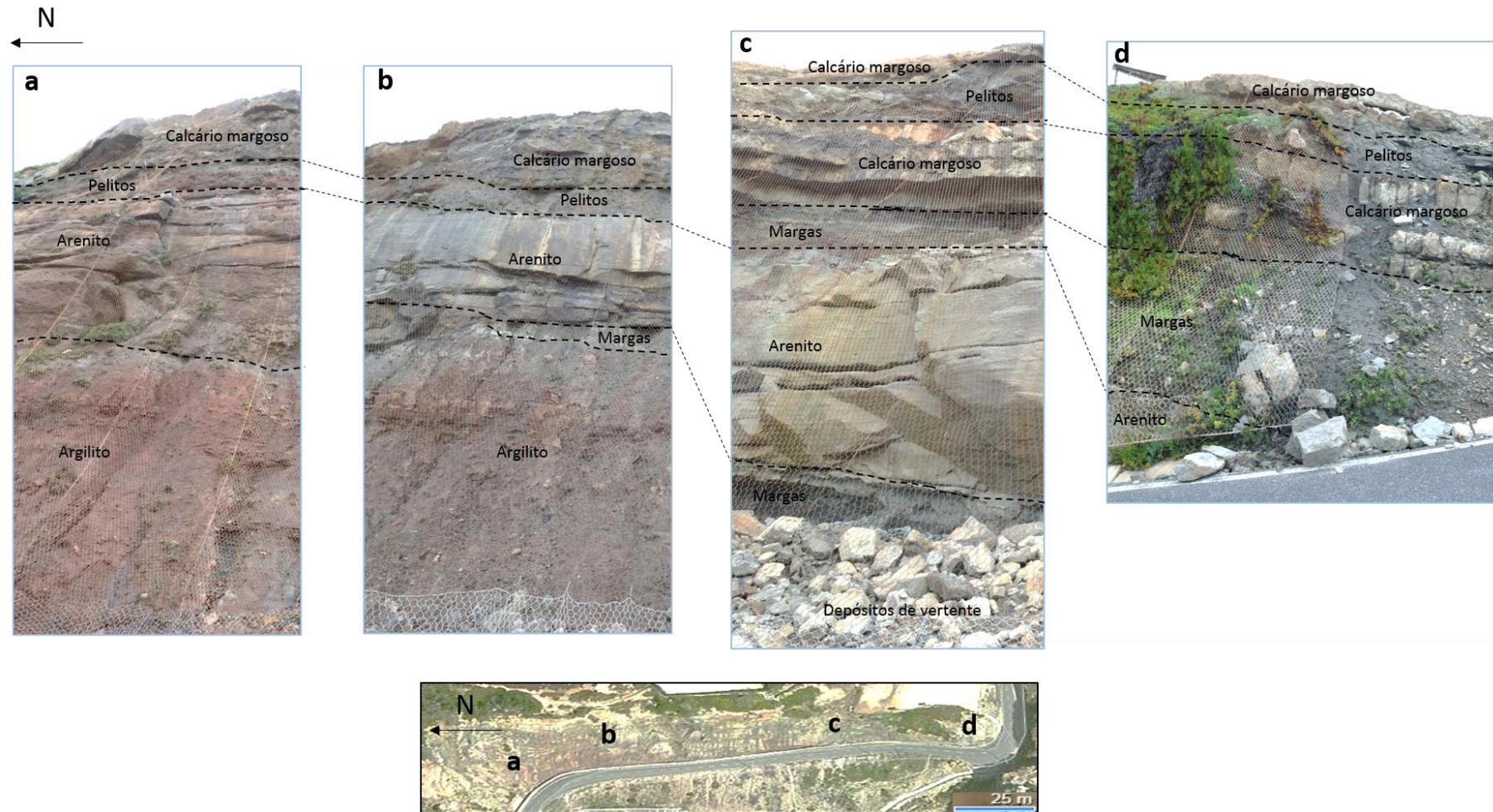


Figura 107 – Caracterização litológica do talude de acesso à praia do Porto da Calada.



Figura 108 - Cartografia de volumes ganhos e perdidos na arriba Sul da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013.

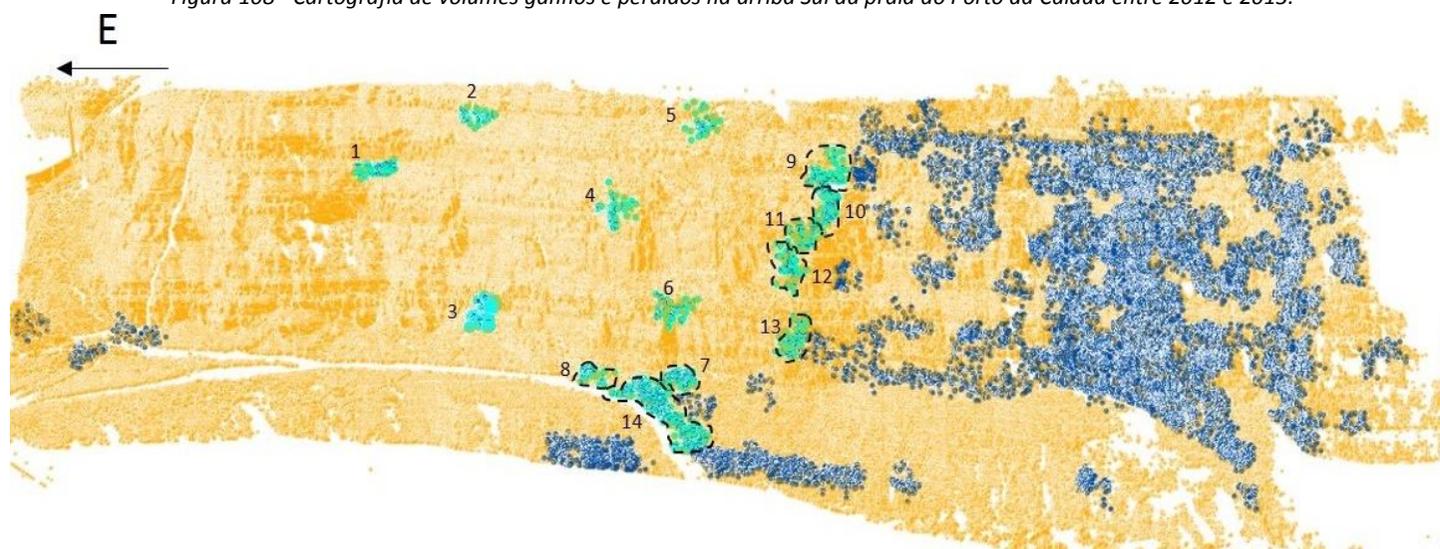


Figura 109 - Cartografia de volumes perdidos na arriba Sul da praia do Porto da Calada entre 2012 e 2013, com movimentos individualmente identificados e caracterizados.

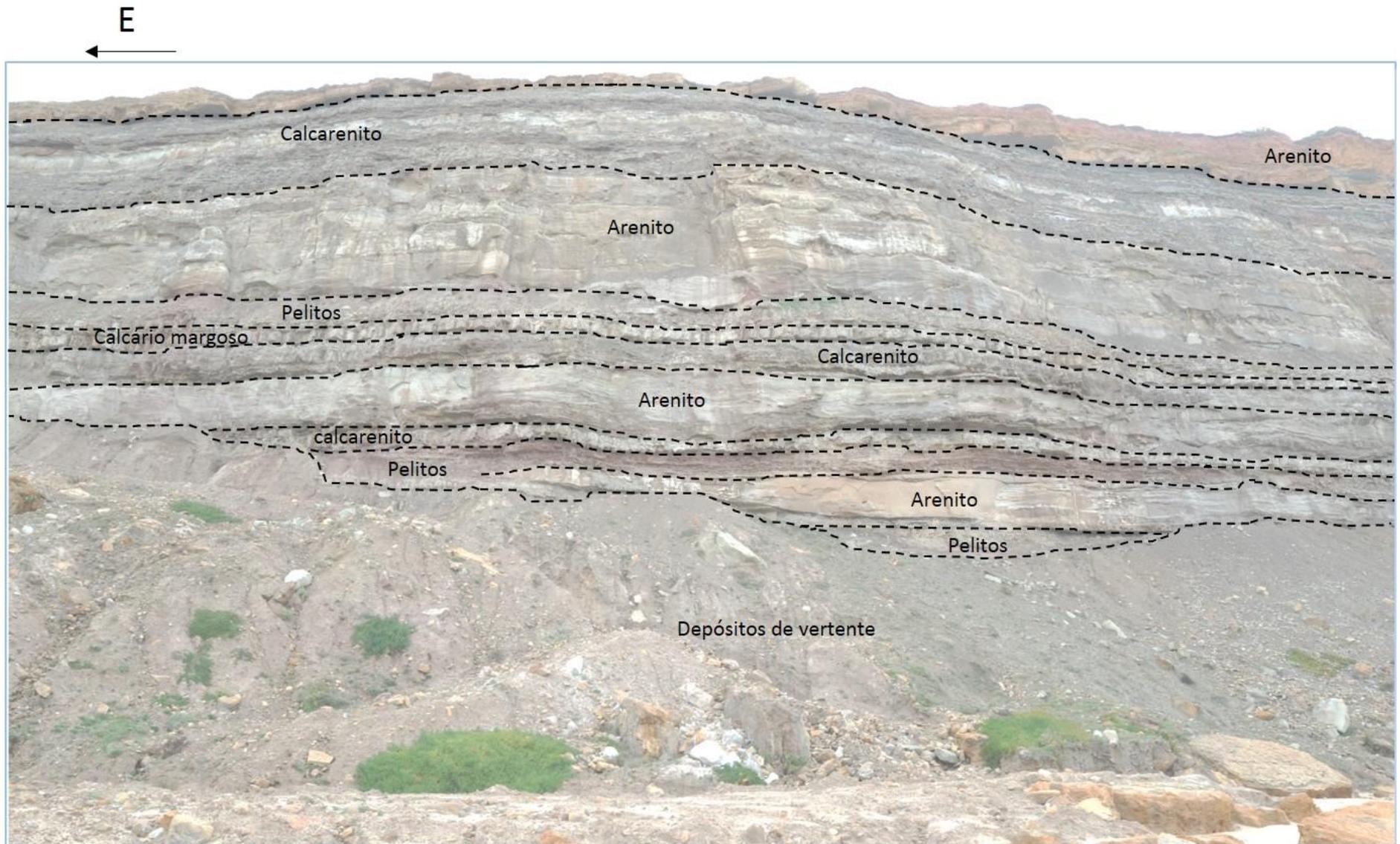


Figura 110 - Caracterização litológica da arriba Sul da praia da Calada.

A informação compilada relativa aos movimentos ocorridos, na forma de inventário, permite estabelecer algumas relações interessantes, como, por exemplo, o número de movimentos por litologia afetada (Figura 111), observando-se que é nas litologias arenito, argilito e calcarenito que se concentra a maior percentagem de movimentos.

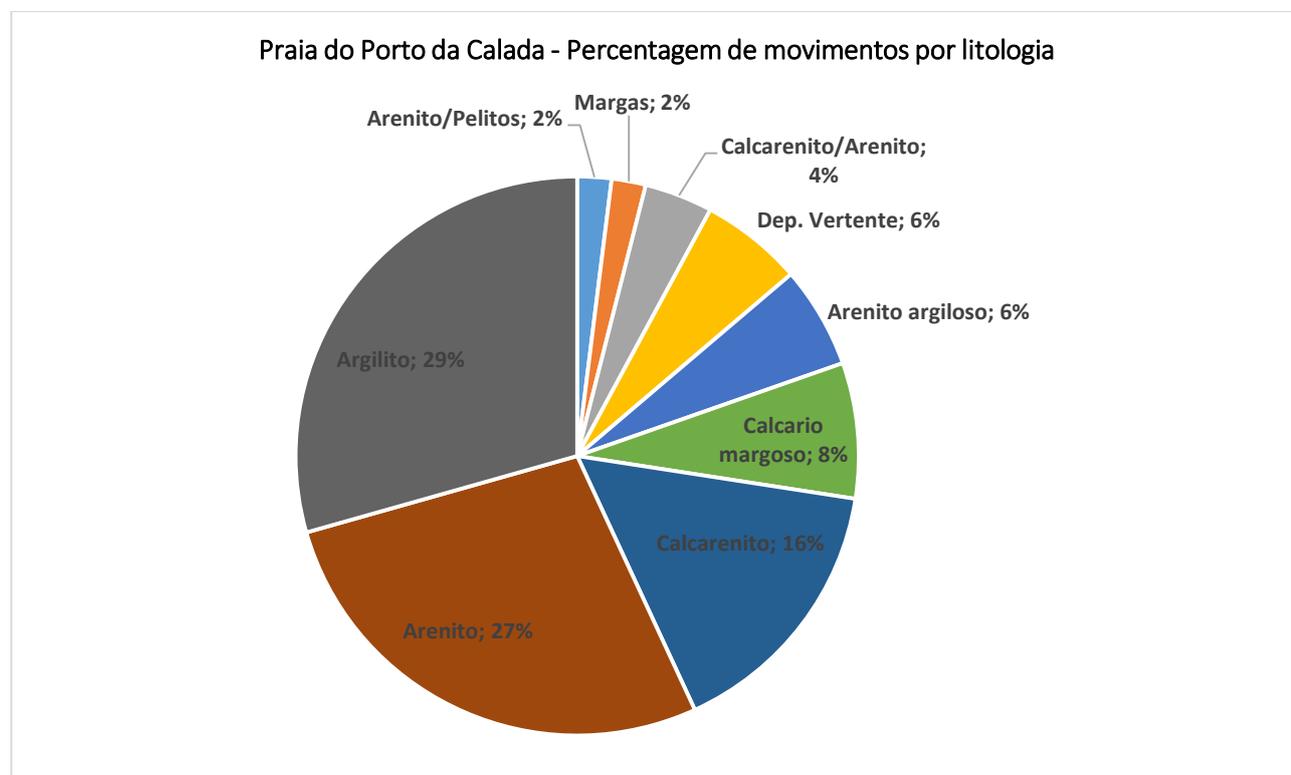


Figura 111 – Percentagem de movimentos ocorridos por litologia.

À semelhança do caso de estudo da praia da Bafureira, tendo os dados relativos ao volume perdido na área de estudo, pode determinar-se uma estimativa do recuo médio das faces das arribas.

Assim, para cada setor, o recuo médio calculado apresenta-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Taxa de recuo médio anual para os três setores da Praia do Porto da Calada.

Setor	Volume perdido (m ³)	Área (m ²)	Taxa recuo médio anual (m/ano)
Arriba Norte	291.06	9520	3.73x10 ⁻²
Arriba Sul*	216.52	10050	2.15x10 ⁻²
Talude da Estrada	355.02	5643	6.29x10 ⁻²

* Apenas na área de estudo do inventário

5.3 Modelação de blocos rochosos

Como referido no ponto 3), na página 82, a existência de blocos rochosos de grandes dimensões ou acumulação de material rochoso no sopé da arriba podem constituir bloqueios de visão para as faces das arribas e podem não ser fiavelmente reproduzidos num levantamento sequencial fotogramétrico da arriba

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

obtido a partir do areal e adulterar valores de alterações ocorridas, em dimensão e volume, nos cálculos de diferenças entre nuvens de pontos. Num levantamento por *laser scanning*, coloca-se igualmente o problema do bloqueio de visão do equipamento, questão também referida na mesma secção, com consequências semelhantes.

Atualmente, os técnicos responsáveis pelo levantamento destas informações utilizam um metro articulado ou um distanciómetro laser de mão como forma de estimar o volume de blocos rochosos ou acumulação de detritos depositados. Assim, de forma a contabilizar rigorosamente os depósitos de sopé resultantes de uma queda de blocos, foi desenvolvida uma metodologia específica, com base em fotogrametria terrestre, utilizando como caso de estudo a praia de São Bernardino.

No período de tempo de monitorização do sector da praia de S. Bernardino, ocorreram dois movimentos de grandes dimensões na estrada de acesso ao areal e apoio de praia (Figura 112, Figura 113).



Figura 112 – Em cima, imagem original do levantamento fotogramétrico para estabelecimento da Época 0; em baixo: levantamento fotogramétrico após queda de blocos a 30/11/2012 – Época 1.



Figura 113 – Imagem do levantamento fotogramétrico após nova queda de blocos– Época 2.

A deposição de blocos de grandes dimensões, resultado de movimento de vertente neste talude (Figura 114), permitiu testar a modelação de blocos isolados por fotogrametria terrestre.

Foram realizadas duas tentativas de determinação do volume de cada bloco caído e depositado na estrada, com o objetivo de melhorar a caracterização geométrica destes elementos que são a primeira informação a ser registada no local pelos técnicos responsáveis, através de estimativa.

Uma primeira abordagem passou pela utilização da nuvem de pontos de diferenças segmentada na região correspondente à lacuna deixada pelo bloco caído, na situação da primeira queda de blocos em 2012. Os pontos dessa região foram utilizados para gerar uma grelha, com uma resolução de 1cm de forma a garantir

a maior proximidade à forma original, por interpolação dos valores das diferenças calculadas em cada ponto (Figura 115).



Figura 114 – Bloco depositado na estrada de acesso ao areal, proveniente do talude – queda de blocos a 30/11/2012.

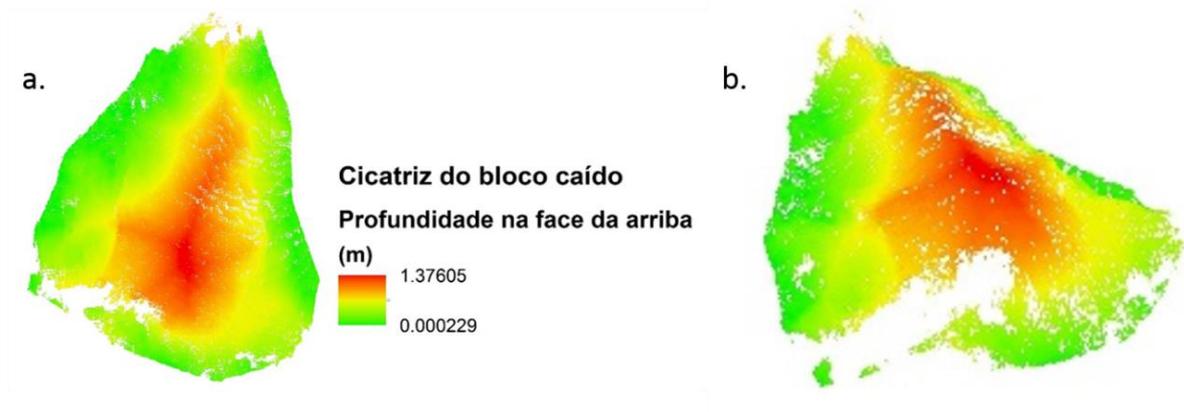


Figura 115 – Superfície da face do talude, modelada a partir da nuvem de pontos de diferenças.

Utilizando a ferramenta *Surface Volume* disponível no *software* ArcGIS 10.3, determinou-se o volume entre a superfície e um plano de referência estabelecido a uma determinada “altura” referente a essa superfície (Figura 116).

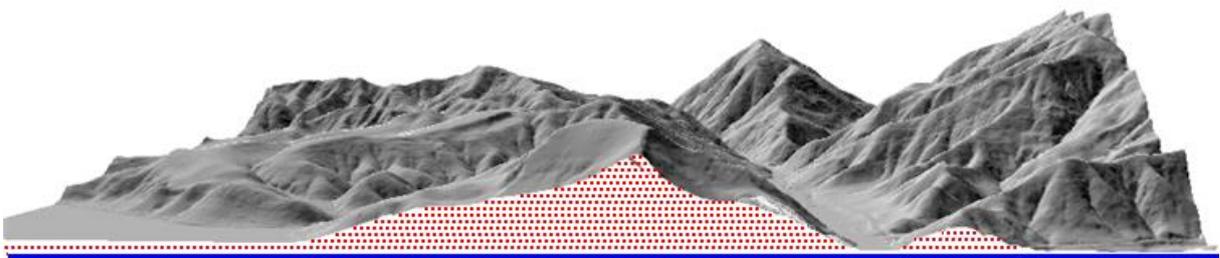


Figura 116 – Esquema de cálculo de volume entre duas superfícies usando a ferramenta *Surface Volume* (ArcGIS 120.3) (Adaptado de ESRI:
http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/java/gp_toolref/3d_analyst_tools/how_surface_volume_3d_analyst_works.htm).

Foi então possível avaliar o volume deslocado em cerca de 6.6 m^3 , tendo sido estimado no local, por técnicos da ARH, em cerca de 6 m^3 . É importante sublinhar que ao analisar a cicatriz da queda de material se está a determinar quantidades que serão certamente superiores à de um bloco individual, não só porque há mais material que se mobiliza quando um bloco rochoso se destaca como, ao longo do percurso de queda e embate na base, há desagregação de zonas do bloco em fragmentos mais pequenos.

No segundo evento, fez-se o levantamento fotográfico sequencial de dois blocos. Não sendo atribuído um sistema de referência terrestre a este elemento, foi usada uma fita métrica metálica que foi sendo posicionada acompanhando o levantamento fotográfico. A utilização desta referência permitiu dar uma escala ao modelo e construir uma nuvem de pontos num sistema local (Figura 117).

Foi criada a nuvem de pontos correspondente ao bloco da Figura 117 (esquerda) utilizando o Photomodeler Scanner. O bloco foi fotografado em todo o redor, com duas fiadas extra, para captar a parte superior do bloco e a região inferior, junto ao chão (Figura 118). A secção em que o bloco está assente não pode, obviamente, ser fotografada pelo que a nuvem de pontos original é incompleta nesta região.



Figura 117 – Bloco rochoso de grandes dimensões, com fita métrica para atribuição de escala ao modelo.

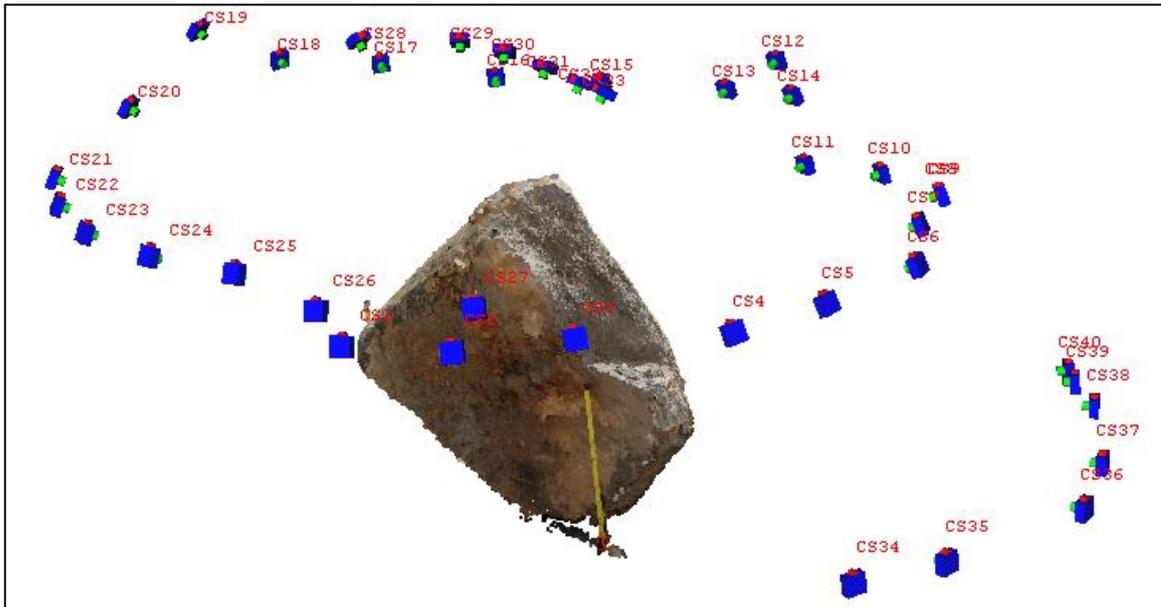


Figura 118 – Nuvem de pontos do bloco modelado com posições de obtenção das imagens originais.

De forma a determinar o volume do bloco, que só pode ser calculado com base num sólido fechado que represente a forma original do bloco, foi necessário completar a nuvem recorrendo à marcação de pontos 3D “fictícios” que pudessem simular a face em que não existe informação. Com as imagens originais orientadas (37 imagens) e a análise cuidada da forma do bloco, foram marcados 32 pontos homogeneamente distribuídos na base do bloco para apoio na operação de triangulação.

O volume do bloco foi determinado com base na nuvem total de pontos, através da definição de uma α -shape usando o valor mínimo de α , como determinado pela densidade e distribuição dos pontos da nuvem em cada região. A menor densidade de pontos na região inferior do bloco obrigou a aumentar o valor de α para que a triangulação da nuvem gerasse um sólido fechado e o volume pudesse então ser determinado. Assim, foi calculada uma α -shape de valor $\alpha=0.25$, contra um valor por defeito de 0.13, e o volume foi calculado em 0.36 m^3 .

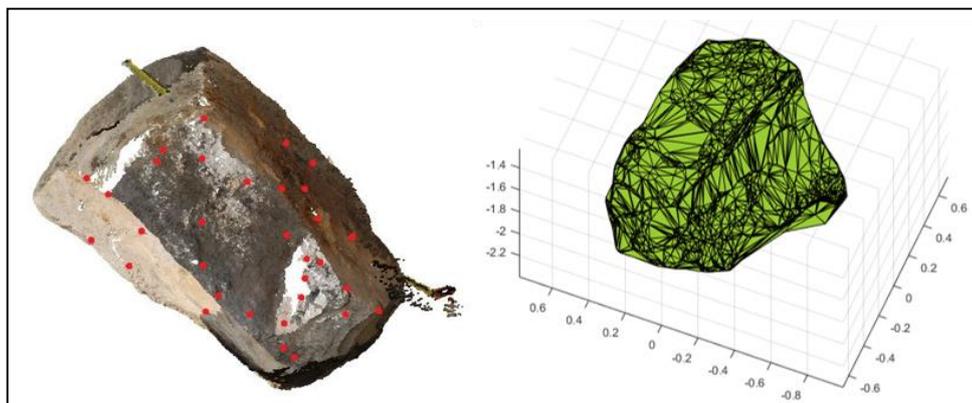


Figura 119 – Modelação fotogramétrica do bloco e imagem da α -shape correspondente.

À semelhança do primeiro bloco, o levantamento fotográfico do segundo bloco (Figura 117, à direita) foi realizado em sequência convergente em torno do bloco, totalizando 40 imagens. A geometria bastante irregular do bloco impediu uma boa cobertura fotográfica numa parte significativa deste e a nuvem de pontos gerada representa-o apenas parcialmente. Para blocos de forma muito irregular e com secções pouco visíveis, é necessário uma cobertura fotográfica mais densa, de modo a cobrir a superfície do bloco o melhor possível.

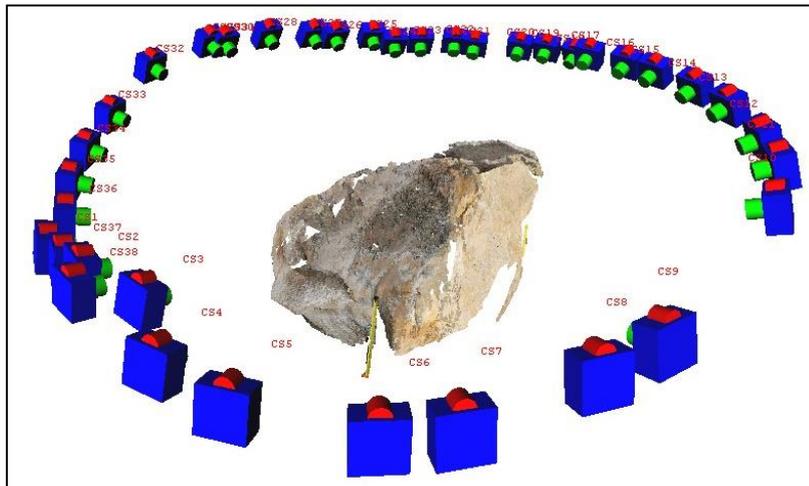


Figura 120 – Cobertura fotogramétrica do bloco.

5.4 Levantamento de zonas inacessíveis

Nos últimos anos, algumas instituições públicas têm requisitado levantamentos aéreos de segmentos do litoral ou mesmo de toda a costa para efeitos de monitorização, quer de regiões arenosas quer rochosas e com arribas. Ao mesmo tempo, algumas equipas de investigação também têm realizado levantamentos aéreos fotográficos de setores costeiros de menores dimensões para estudos de geomorfologia e avaliações qualitativas das mudanças à escala regional. Estes levantamentos são geralmente de baixo custo e são realizados usando pequenas aeronaves tripuladas, sem GPS ou dispositivos IMU a bordo, onde um operador com uma câmara de amador fotografa a costa obliquamente enquanto o avião se desloca paralelamente a ela. Para uma avaliação quantitativa de alta precisão este método não cumpre todos os requisitos necessários, como seja a velocidade da plataforma, que não permite uma visualização estereoscópica correta a menos que seja usada para a obtenção das imagens uma câmara de elevada qualidade com pequenos intervalos de disparo automático, um cartão de muito alta capacidade de armazenamento e um sistema de transmissão de dados entre a câmara e o cartão suficientemente rápido para permitir guardar os dados de forma quase contínua. Além disso, a proximidade de deslocação do avião relativamente ao objeto é, por razões de segurança, insuficiente para um produto de alta qualidade (em relação à geometria e radiometria) e, por fim, uma georreferenciação precisa destas imagens é quase impossível. A possibilidade de gravar um vídeo supera alguns dos problemas apontados, mas os relacionados com a alta velocidade e pouca proximidade ao objeto permanecem.

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) de baixo peso e dimensões não conseguem operar de forma correta em zonas costeiras como a costa ocidental de Portugal dados os seus ventos quase permanentes e rajadas de vento de alta intensidade. Estas condições desestabilizam muito facilmente a plataforma, comprometendo os voos e a integridade física do próprio VANT e os equipamentos a ele associados (como câmaras ou dispositivos

Wi-Fi para comunicações ar-terra) para os quais o VANT pode nem ter as características certas para os transportar. VANTs mais robustos podem ter um melhor desempenho nestes setores e estão de facto a ser utilizados globalmente para missões de reconhecimento, vigilância e aquisição de alvos, missões civis, como gravimetria aérea, fotografia aérea, vigilância e controle do tráfego marítimo, vigilância da pesca, e deteção e controlo de riscos costeiros (Pereira *et al.*, 2009), mas além de serem bastante mais dispendiosos, necessitam de uma logística complexa. Este tipo de VANTs não são equipamentos muito comuns no mercado e a maioria pertencem a empresas privadas de cartografia ou à Força Aérea Portuguesa.

Embora não haja, presentemente (2016), uma figura jurídica específica para a utilização dessas plataformas em Portugal, existem rigorosas restrições de voo em áreas urbanas ou áreas de concentração de pessoas, como o caso de praias e áreas vizinhas, por motivos de segurança. Por fim, qualquer que seja o tipo de VANT usado para capturar imagens, o *software* necessário para o processamento e orientação das imagens ainda é muito caro e o *know-how* para executar a tarefa altamente especializado, tornando o uso desta plataforma e correspondentes resultados, uma opção dispendiosa para as autoridades costeiras, ainda que potencialmente muito útil.

As arribas litorais apresentam, por um lado, um ambiente relativamente hostil para técnicos e cientistas mas por outro constituem áreas privilegiadas de colunas verticais de vento que fornecem o impulso necessário para lançar e manter um voo de parapente. Muitos turistas, usando uma câmara robusta montada nos capacetes ou fixa na armação do parapente, realizam a gravação do seu voo em modo vídeo. Exceto nos momentos de levantar e aterrar, o voo é suave e capturar as perspetivas mais interessantes e a curta distância da face da arriba torna-se bastante simples.

O parapente provou ser uma plataforma rápida, estável e de confiança para transportar uma câmara e, ao contrário dos VANTs, possui as permissões legais para sobrevoar com segurança praias e zonas com ocupação humana. O tipo de voo, ao longo da direção do comprimento da arriba, pode fornecer informações de longos sectores de arriba, especialmente em áreas onde a segurança dos técnicos possa ser posta em causa ou onde o acesso à plataforma de base é difícil ou mesmo impossível, como arribas mergulhantes.

A posição da plataforma relativamente à altura e declive das arribas fornece uma perspetiva favorável a meia altura das arribas obviando alguns dos problemas que os levantamentos tradicionais terrestres por vezes colocam devido ao posicionamento da câmara ou *laser scanner* na plataforma de base, tal como zonas salientes que bloqueiam a visibilidade para a zona mais alta da arriba. O formato vídeo é uma boa solução para capturar quase todas as irregularidades que poderiam ser perdidas com fotografias discretas, uma vez que permite a escolha de uma base fotográfica variável *a posteriori*, trabalhando com o intervalo de *frames* mais adequado. É também um método mais rápido e simples para cobrir grandes extensões de litoral.

A hipótese inicial colocada foi: poderão os vários vídeos feitos a partir de parapente, atividade comum nas zonas de arriba na costa oeste, ser usados para auxiliar a tarefa de monitorização de arribas (Figura 121)? Após visualização de diferentes vídeos, verificou-se que a maioria cobre sempre parte significativa da face da arriba, mas as sequências em que esta região das arribas está bem representada, significando de uma perspetiva perto da ortogonal à face, eram muito curtas e com muito pouca continuidade. Tal facto comprometia questões vitais como a orientação das imagens e georreferenciação.



Figura 121 – Perspetiva da arriba vista da câmara GoPro Hero 2 montada no parapente.

Foi contactado um profissional para realizar um voo o mais estável possível, a meia altura da arriba, e com distância à face tal que fosse possível um ponto de vista perpendicular ao declive da arriba. As imagens foram então retiradas de um vídeo MP4 de 4 min 22 s gravado por uma câmara montada na armação de um parapente. Este voo foi realizado entre a praia do Magoito e a praia de Azenhas do Mar (Figura 122).

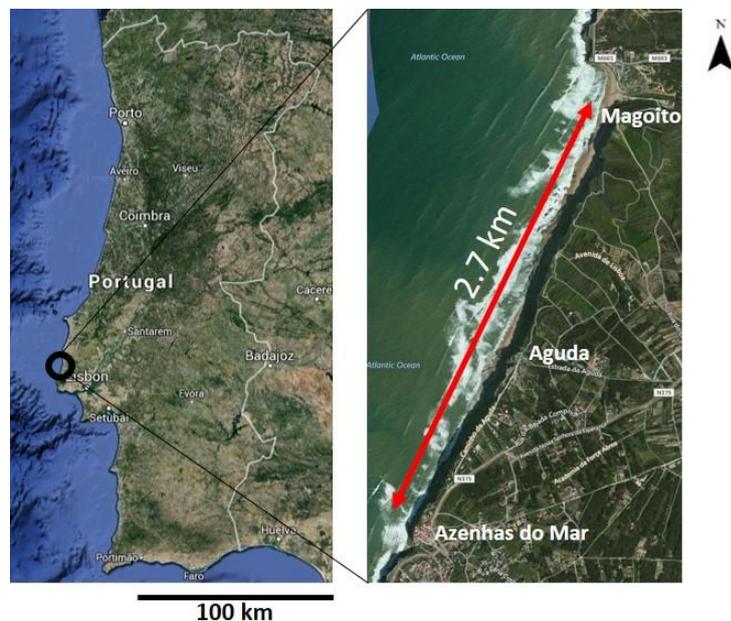


Figura 122 – Enquadramento geográfico das praias do Magoito e Azenhas do Mar (fonte das imagens: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community).

A câmara utilizada para filmar, uma GoPro Hero 2, é muito leve e robusta, e apresenta um campo de visão muito amplo (FOV). Estas características bem como a qualidade de imagem tornam esta câmara uma boa candidata para uso em levantamentos fotográficos do terreno, embora não seja recomendada para projetos fotogramétricos devido à sua forte distorção em barril, e outras desvantagens como a ausência de *view finder*, variedade de modos de captura de imagem e vídeo que reduzem a resolução da imagem (Walford 2013). Além disso, a existência de um *rolling shutter*, ou obturador de rolamento, muito comum em sensores CMOS, em detrimento de um obturador mecânico central, deve ser considerada. Esta questão é desenvolvida na Discussão.

Foi desenvolvido um script em Matlab para retirar e guardar, em intervalos definidos pelo utilizador, os *frames* do vídeo como imagens em formato TIFF sem compressão, de forma a evitar perda de precisão e qualidade, e mantendo todas as características originais do vídeo, tais como dimensões e resolução de imagem. Com o script desenvolvido é possível escolher diferentes bases fotográficas ao longo da sequência, dependendo das necessidades. Considerando que foram registados 30 *frames* por segundo (fps), um intervalo de 60 *frames* foi inicialmente escolhido para obter imagens para o processamento fotogramétrico, obtendo-se um total de 121 imagens para processar. De forma a realizar uma avaliação prévia e considerando as experiências realizadas por diferentes autores (ex. James e Robson 2012, Dewez 2014, Ward 2014), foram testados vários programas livres ou de código aberto com as imagens para obter um modelo 3D da superfície da arriba. Foram testadas as aplicações Bundler (Snavely *et al.* 2006, 2007), 123D Catch (Autodesk, Inc.), CubifyCapture (3DSystems, Inc.) e VisualSFM (Falkingham 2013; Wu, 2013; Wu *et al.*, 2011).

O único *software* livre que gerou resultados, ainda que não satisfatórios, foi o VisualSFM. Embora o SiftGPU para deteção e correspondência de pontos homólogos tenha corrido bem, na fase de cálculo de PBA para nuvem esparsa e de aplicação do PMVS/CMVS para reconstruções 3D densas, respetivamente, os resultados revelaram um modelo altamente distorcido, impossível de usar para qualquer fim (Figura 123). Tal deveu-se a uma deficiente consideração das distorções da objetiva na orientação interna. Tentou-se, então, corrigir as imagens das distorções e introduzi-las no processamento já corrigidas. A alta distorção em barril associada à câmara GoPro gera, aquando da correção das distorções, imagens com margens pretas em forma de meia-lua (Figura 124). Estas fronteiras, que ocupam uma área significativa da imagem, dificultam o uso das imagens corrigidas no VisualSFM ou em qualquer outro *software* de correlação de imagem referido que usa imagens corrigidas da distorção, uma vez que estas margens farão parte das nuvens de pontos, causando ruído inadmissível no modelo final. Este é um problema que não ocorre no PhotoModeler Scanner uma vez que este aplica as correções às distorções à medida que a nuvem de pontos está a ser gerada, sem que haja qualquer modificação nas imagens originais.



Figura 123 – Nuvem de pontos obtida com o VisualSFM, a partir das imagens da GoPro.



Figura 124 – Esquerda: imagem tiff original extraída do vídeo MPEG-4; Direita: a mesma imagem corrigida das distorções da lente.

Foi iniciada uma abordagem tradicional usando o PhotoModeler Scanner: a calibração da câmara, a determinação automática de pontos homólogos para a orientação relativa, a orientação absoluta interativa por meio de pontos fotogramétricos e, finalmente, a geração automática de nuvens de pontos da arriba e respetivo controlo de qualidade.

As definições de gravação do vídeo no terreno e, conseqüentemente, reproduzidas no processo de calibração da câmara são: formato MPEG-4, resolução de 1920 x 1080 pixels – cerca de 2 Megapixel -, a 30 fps.

O programa PhotoModeler Scanner calcula a distância focal da objetiva, os parâmetros de distorção (radial e tangencial), o formato geométrico dos *frames* e as coordenadas do ponto principal das imagens. O modelo de distorção usado pelo programa PhotoModeler Scanner 2013 é equivalente ao modelo apresentado por Brown (1971) para o processo de auto-calibração (Eqs. 40 a 42).

$$dr = K1 \times r'^2 + K2 \times r'^4 + K3 \times r'^6 \quad (40)$$

$$dpx = P1 \times (r'^2 + 2 \times x^2) + 2 \times P2 \times x \times y \quad (41)$$

$$dpy = P2 \times (r'^2 + 2 \times y^2) + 2 \times P1 \times x \times y \quad (42)$$

onde dr é a distorção radial, dpx e dpy as componentes da distorção tangencial, em mm, medidas a partir do ponto principal, e r' , x e y são em mm, medidos a partir do ponto principal.

O desempenho ótico de lentes olho de peixe ou grande angular, como é o caso da GoPro, diminui com o aumento do ângulo, evidenciando rápida degradação na qualidade geométrica e radiométrica da imagem, aparente na incapacidade de capturar linhas retas no objeto como linhas retas na imagem e na redução da iluminação para os extremos da imagem (Luhmann *et al.*, 2013). A degradação radiométrica para as margens não é visível nos *frames* utilizados neste trabalho. Pelo contrário, uma forte distorção em barril é claramente evidente (Figura 125).



Figura 125 - Esquerda: frame da GoPro Hero 2, apresentando forte distorção em barril; Direita: a mesma área capturada com uma câmara DSLR.

Não há nenhuma informação sobre a lente incorporada na câmara usada, menos ainda sobre a geometria inerente, o que seria fundamental para a aplicação do modelo geométrico adequado e, por conseguinte, determinar os parâmetros corretos para correção da distorção da imagem. Foram realizados alguns testes de forma a recuperar o modelo geométrico correto, baseados em Luhmann *et al.* (2013), mas os resultados foram inconclusivos. Embora esta seja uma questão fundamental no processamento de imagens obtidas com lentes de olho de peixe, a inexistência das informações básicas necessárias impedem uma investigação mais detalhada. Este obstáculo deve ser considerado quando se avalia a qualidade dos produtos finais.

Uma outra fonte de erro é a existência do obturador de rolamento na câmara GoPro. Sempre que existe movimento relativo entre a câmara e o objeto, um obturador deste tipo coloca problemas que não se podem negligenciar. Uma vez que cada linha de cada *frame* é gravada num momento diferente no tempo, o objeto aparece distorcido no *frame* final (Figura 126). Este efeito não afetou as imagens obtidas para o processo de calibração uma vez que foi seguida uma estratégia adequada.

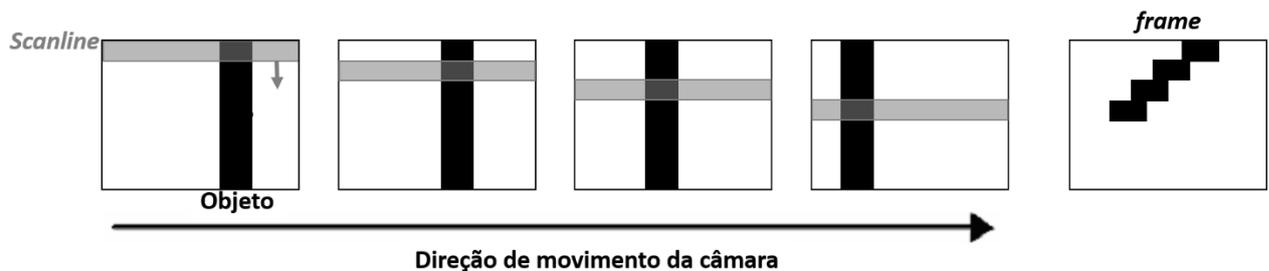


Figura 126 - Efeito do obturador de rolamento, top-down, em objetos verticais com câmara em movimento. (adaptado de Chang *et al.* 2005).

Para reproduzir o mais fielmente possível as condições da câmara durante a gravação no local, as imagens de calibração foram extraídas do formato de vídeo MP4 com o script Matlab desenvolvido. Tomando em consideração que um vídeo contínuo seria registado, foi colocada uma folha A4 escura num extremo da área de calibração de modo a facilitar a escolha dos *frames* mais adequados para a calibração com as necessárias variações de orientação e rotação dos eixos da câmara.

Foi gravado um vídeo de 2 min 50 s em torno do campo de calibração, garantindo imagens estáveis nas três posições de rotação necessárias da câmara: paisagem, retrato com rotação de 90° para a direita e 90° para a esquerda. No final, um conjunto de 26 imagens foi escolhido a partir de um total de 5114 *frames*.

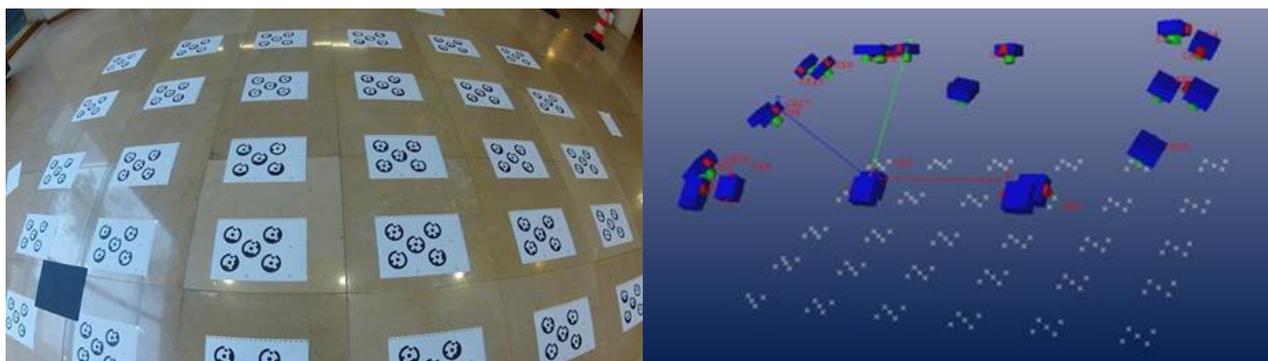


Figura 127 -Esquerda: imagem original do campo de calibração; Direita: esquema 3D dos alvos e posições da câmara na calibração.

Todos os parâmetros de distorção radial e tangencial possíveis foram determinados, o que é essencial para este tipo de lente e efeitos (Luhmann *et al.*, 2013) (Tabela 12, Figura 128).

Tabela 12 - Resultados da calibração da objetiva

Largura da imagem (pixels)	1920	Ponto principal (X) (mm)	4.499 ± 0.001
Altura da imagem (pixels)	1080	Ponto principal (Y) (mm)	2.620 ± 0.001
Distância focal (mm)	4.535 ± 0.001	K1 (mm ⁻²)	$0.02007 \pm 5.3E-005$
Largura da imagem (mm)	$9.068 \pm 4.9E-004$	K2 (mm ⁻⁴)	$-6.859E-005 \pm 6E-006$
Altura da imagem (mm)	5.062	K3 (mm ⁻⁶)	$3.8E-005 \pm 2.2E-007$
		P1 (mm ⁻²)	$-6.658E-005 \pm 1.1E-005$
		P2 (mm ⁻²)	$-1.004E-004 \pm 1.3E-005$

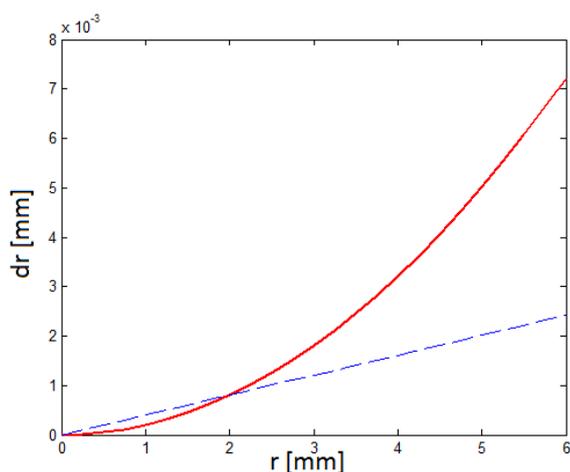


Figura 128 - Modelação da distorção radial (a vermelho) e a respetiva incerteza (em azul).

O erro total final de 1.52 considerou-se ser um resultado satisfatório atendendo às características atípicas de todo o procedimento. Apesar de não ter sido aplicado qualquer modelo geométrico específico para lentes olho de peixe, os parâmetros calculados parecem reduzir significativamente as distorções como mostrado na Figura 129, onde é evidente que as linhas retas no objeto (por exemplo, piso de mosaico e margens das folhas) aparecem na imagem corrigida como linhas retas.

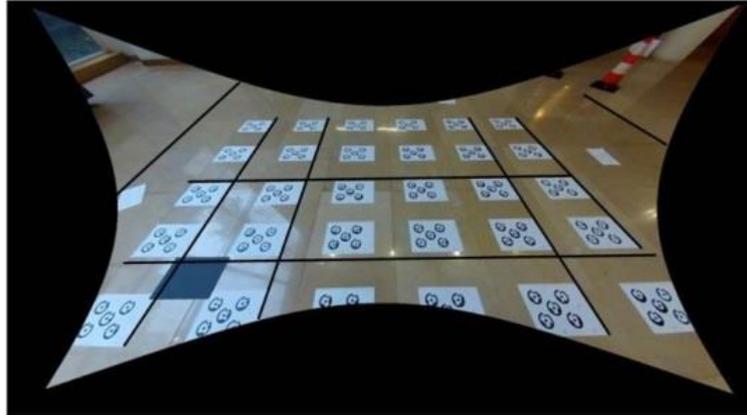


Figura 129 - Imagem corrigida das distorções da lente: linhas a preto salientam a junção dos mosaicos, como linhas retas.

5.4.1 Orientação das imagens e geração da nuvem de pontos

Uma lacuna de cerca de 200 *frames* - 6 s de vídeo - foi suficiente para interromper o processo de orientação relativa automática do conjunto total de imagens uma vez que as imagens imediatamente antes e depois da lacuna não compartilhavam qualquer característica comum detetável automaticamente por correlação. Assim, dividiu-se o conjunto em duas fiadas distintas de 77 e 45 imagens cada.

Foi realizada uma campanha de campo para coordenar um conjunto de pontos fotogramétricos no terreno (GCP), localizados no topo e na base da arriba, para a triangulação. Estes pontos fotogramétricos foram coordenados com um recetor Leica Viva NetRover (GS08 GNSS Receiver e CS10 3.5G Field Controller) usando posicionamento RTK e recorrendo à rede GPS permanente RENE (RENEP, 2014). Os pontos foram registados quando uma precisão 3D em tempo real melhor do que 0.05 m estava garantida.

Os eventos extremos de tempestades que ocorreram em Janeiro de 2014, entre o voo e a campanha de campo, alteraram profundamente o volume de areia na praia e a disposição de blocos rochosos na plataforma da base da arriba, de modo que em algumas áreas foi impossível identificar, na base da arriba, pontos naturais comuns entre a realidade física e as imagens, o que teve consequências negativas diretas. A primeira fiada foi georreferenciada com base em 5 pontos fotogramétricos. A segunda fiada não pôde ser corretamente georreferenciada, devido à falta de um bom conjunto de pontos fotogramétricos, impedindo assim o seu processamento.

Relativamente à primeira fiada (cerca de metade da zona de estudo), depois de 47 *frames* (cerca de 60% da fiada), a perspetiva da câmara mudou ligeiramente, bem como a velocidade de voo do parapente, e o intervalo inicial de 60 *frames* tornou-se insuficiente para correta correlação de imagens. Assim, um novo conjunto de 78 imagens desta área foi retirado do vídeo original, com intervalo de 20 *frames*, que foi adicionado ao projeto e o processamento da nuvem de pontos foi retomado e a orientação e georreferenciação do conjunto total (agora 125 imagens) resultou num erro final de 0.37 (Figura 130).

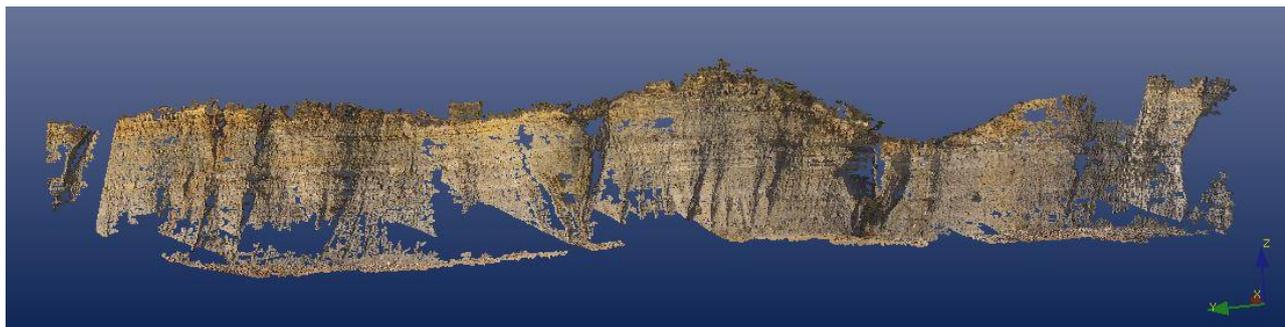


Figura 130 - Nuvem de pontos obtida com as imagens da GoPro Hero 2 (=60% do sector Magoito-Aguda).

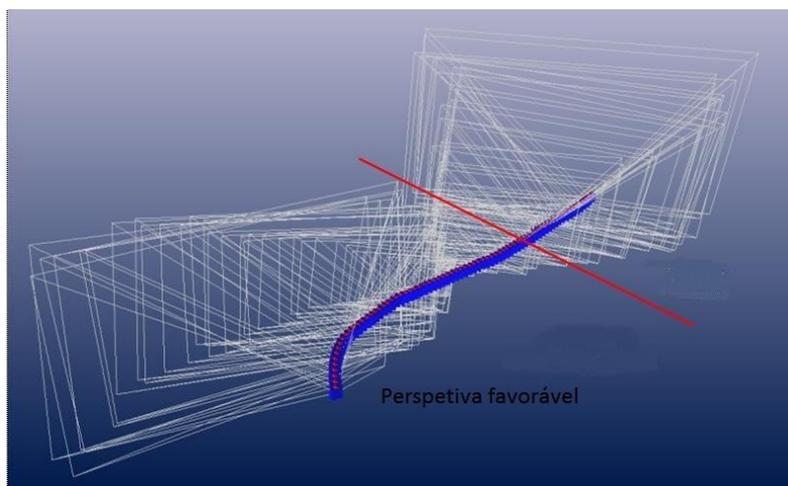


Figura 131 – Posições da câmara e perspectivas das imagens ao longo da sequência de vídeo, mostrando a divisão (a vermelho) entre as perspectivas favorável e desfavorável.

No entanto, um intervalo menor entre *frames* também não resolveu os problemas da segunda parte desta fiada. Analisando a configuração da fiada (Figura 131) os problemas relacionados com a mudança na perspetiva são evidentes. Na segunda parte, a câmara foi reorientada (depois de uma interação do piloto) passando a estar posicionada com o eixo ótico quase paralelo à face da arriba, produzindo imagens quase coaxiais. Esta disposição câmara-objeto não é favorável à correlação de imagens pois o objeto aparece em escalas muito diferentes de *frame* para *frame* e a

convergência dos raios luminosos é fraca na maioria dos pontos do objeto, dificultando a geração da nuvem 3D.

5.4.2 Avaliação da qualidade do produto geométrico

Para a avaliação da qualidade geométrica da nuvem de pontos uma segunda campanha de campo foi realizada, desta vez usando uma estação total Leica TS02 *reflectorless* estacionada na base da arriba, onde um novo conjunto de 31 pontos foi adquirido. O estacionamento do equipamento foi realizado com recurso a dois pontos coordenados com o recetor Leica Viva NetRover (GS08 GNSS Receiver e CS10 3.5G Field Controller) usando, mais uma vez, posicionamento RTK com base na rede RENE (RENEP, 2014).

Os pontos de controlo foram medidos nas imagens e as respetivas coordenadas 3D comparadas com as coordenadas de campo. Na verdade, devido à baixa resolução das imagens utilizadas, a maioria dos pontos de controlo, coordenados e registrados com elevado detalhe no campo, não era reconhecível na nuvem de pontos, de modo que a medição de 14 dos 31 pontos foi realizada nas imagens que originaram a nuvem de pontos em vez de na nuvem propriamente dita. No entanto, o resultado da comparação efetuada constitui um indicador da qualidade da georreferenciação ao longo da nuvem.

As diferenças entre as coordenadas 3D medidas no projeto e as medidas no campo apresentaram uma diferença média de 0.54 m.

Embora este valor seja expectável tendo em conta os obstáculos até agora mencionados como a distorção profunda em barrilete, a má resolução de imagem, as variações na perspetiva das imagens, etc., ele não cumpre com os requisitos de monitorização de alta resolução que deverão alcançar uma precisão 3D de ± 0.15 m.

Considerando as dificuldades da metodologia utilizada para a avaliação do controlo de qualidade, outra tentativa foi feita usando o CloudCompare, que permite o registo de duas nuvens de pontos.

A nuvem de pontos da mesma área, com cerca de 350 m de comprimento, obtida por meio de fotogrametria terrestre, apresentou diferenças médias nos pontos de controlo de 0.10 m, 0.04 m e 0.05 m em X, Y e Z, portanto, de 0.11 m em 3D, sendo, posteriormente, tomada como referência. A extensão coberta por esta nuvem de referência é ligeiramente menor do que a nuvem de pontos obtida com a GoPro. Esta última foi registada sobre a primeira usando o algoritmo *iterative closest point* (ICP) (Zhang, 1994), implementado no *software* CloudCompare. Na prática, este procedimento constitui uma forma independente de georreferenciação da nuvem da GoPro.

As diferenças entre a nuvem de pontos registada a partir de imagens GoPro e a de referência foram calculadas usando o algoritmo C2C.

As diferenças encontram-se uniformemente distribuídas por toda a nuvem (Figura 132). Este método permitiu a georreferenciação da nuvem GoPro com uma incerteza de 0.50 m para 76.82% e de 0.10 m para 16.65% dos quase 3 milhões de pontos (Figura 133).

É importante sublinhar que um pequeno número de diferenças pode corresponder de facto a alterações na face da arriba que possam ter ocorrido durante o período temporal entre o levantamento fotogramétrico terrestre (Maio de 2013) e o vídeo obtido com a GoPro (Outubro de 2013).

Estes resultados, obtidos através de um método mais robusto de georreferenciação, confirmam que a qualidade geométrica global de uma nuvem de pontos obtida pelas imagens aéreas oblíquas da GoPro Hero é cerca de 0.5 m.

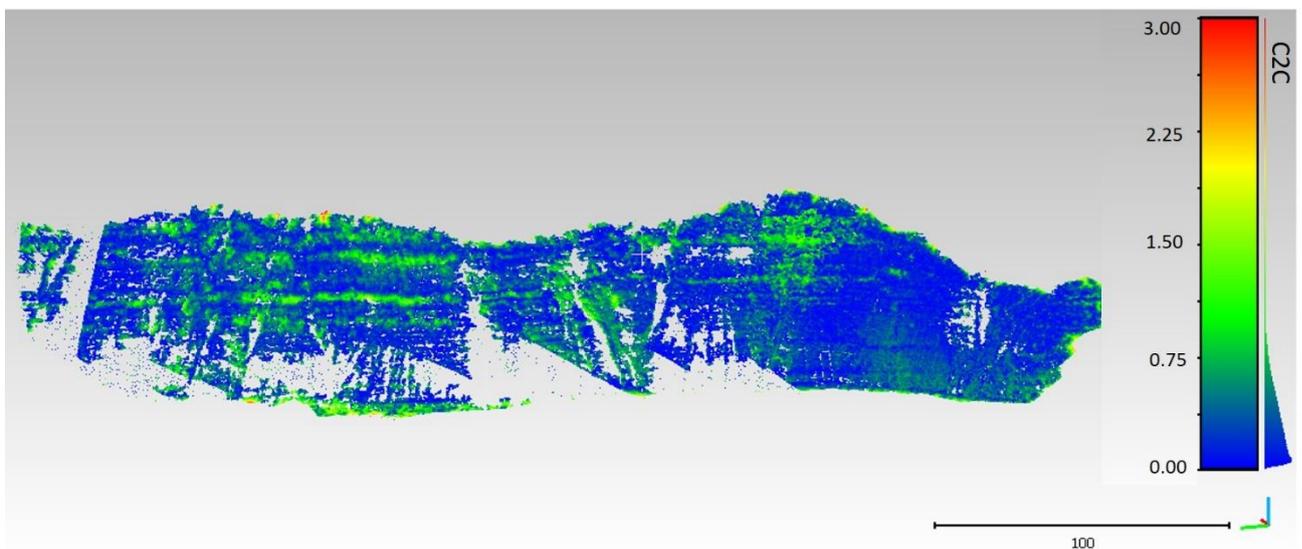


Figura 132 - Distâncias absolutas entre a nuvem de pontos obtida com a GoPro e a nuvem de referência.

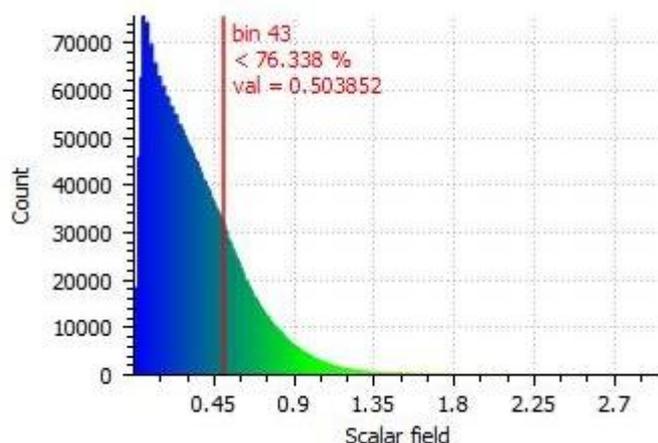


Figura 133 – Histograma das diferenças absolutas entre as duas nuvens de pontos.

Discussão

As duas abordagens testadas para a geração de modelos 3D de nuvens de pontos usando imagens de vídeo capturado por uma câmara GoPro Hero 2 montada num parapente - *software* livre e com PhotoModeler Scanner - permitiu verificar a importância da aplicação de um modelo geométrico correto da câmara na geração destes modelos. *Software* de geração automática de modelos de nuvens de pontos como Bundler, 123DCatch, CubifyCapture e VisualSFM, foram testados com conjuntos de *frames*, mas não foram alcançados resultados ou se atingiram resultados insatisfatórios. Apenas a aplicação VisualSFM gerou uma nuvem de pontos densa, mas de geometria incorreta. Assume-se que esta dificuldade deriva da aplicação de modelos geométricos deficientes incapazes de calcular as elevadas distorções de lentes olho de peixe como a da câmara GoPro.

Relativamente às correções da distorção, apesar de não ter sido utilizado previamente ao processamento qualquer modelo geométrico, tal como recomendado por Luhmann *et al.* (2013), uma vez que nenhuma informação sobre a lente estava disponível, verificou-se que o modelo de distorção utilizado pelo PhotoModeler Scanner funcionou corretamente: linhas retas no objeto são apresentadas como linhas retas nas imagens corrigidas de distorção.

O processo de orientação relativa automática foi bem sucedido apenas na primeira sequência de *frames* em que as perspetivas eram favoráveis para o processo de correlação de imagens. Eixos óticos quase coincidentes ao longo do voo e câmara quase paralela à orientação da arriba tornaram impossível a geração de nuvens de pontos na segunda sequência de *frames*. É evidente que, para o processamento fotogramétrico de uma fiada longa, a perspetiva deve ser o mais perpendicular possível à inclinação da arriba e é imperativo evitar alterações "cegas" na direção da câmara durante a gravação.

Embora a resolução original do vídeo – 2 megapixel – ter sido garantida na aplicação do script Matlab desenvolvido, as imagens apresentaram baixa resolução, tendo afetado negativamente a marcação dos pontos de controlo no processo de georreferenciação e, especialmente, a medição dos pontos de verificação para avaliação da qualidade. Os resultados obtidos relativamente à qualidade geométrica não estão em conformidade com os requisitos de uma monitorização de alta resolução. Este problema poderá

eventualmente ser atenuado com os mais recentes modelos de câmara GoPro ou outras similares que apresentam resoluções de vídeo mais elevadas.

A abordagem usando uma nuvem de pontos de boa qualidade geométrica, gerada a partir de um levantamento fotogramétrico terrestre, como referência para registrar a nuvem de pontos GoPro revelou ser o método mais robusto e conveniente para a georreferenciação dessas nuvens e avaliar a sua qualidade geométrica. Este método foi aplicado usando o programa CloudCompare. Verificou-se que cerca de 77% dos quase 3 milhões de pontos apresentam diferenças em 3D abaixo de 0.50 m, que são distribuídos uniformemente ao longo de ca. 350 m de arriba. Estes resultados também revelaram que a nuvem de pontos da GoPro não foi distorcida apesar de todos os obstáculos encontrados no processo.

Apesar de não ser detetável a olho nu, o *obturador de rolamento* causa distorção nos *frames* devido ao movimento da câmara, deteriorando a qualidade geométrica da nuvem resultante. Ao contrário das distorções das objetivas, o efeito de “persiana” na imagem depende da distância da câmara ao objeto e, portanto, é difícil de modelar quando nenhuma informação 3D densa do objeto for conhecida a priori, que é a situação mais comum. Uma simulação do efeito geométrico do obturador de rolamento no objeto foi realizada: assume-se um objeto fixo (arriba) e uma câmara em movimento (GoPro Hero 2 no parapente) que captura um vídeo com um obturador de rolamento vertical. A velocidade do obturador é desconhecida, bem como o tempo de exposição das linhas dos *frames*. A taxa de gravação de *frames*, pelo contrário, é conhecida - 30 fps - isto é, cada *frame* é gravado num intervalo de tempo de 1/30 s. Parte deste tempo será tempo de exposição e o tempo restante é atribuído à gravação da imagem linha após linha. Para simplificar, toma-se como pior cenário a operação do obturador ocupar os 1/30 s. Neste intervalo de tempo, a câmara move-se com a plataforma, resultando em que partes do objeto são gravadas em cada linha como sendo vistas a partir de diferentes posições da câmara fotográfica. Este efeito afeta todo o *frame* e é particularmente visível no caso de objetos que se posicionam perpendicularmente à direção de movimento da câmara e paralelamente à direção de movimento do obturador de rolamento. O efeito é tão mais forte quanto mais perto o objeto está da câmara e quanto maior for a velocidade da câmara.

Para a simulação, foi calculada uma velocidade média de 10.7 m/s para a deslocação do parapente/câmara, a partir da sequência de *frames*. Assumindo uma arriba de face plana, sem irregularidades no seu declive, a uma distância constante da câmara ao longo do voo, uma escala de imagem média de 1:15 000 foi determinada. Nestas condições, numa morfologia vertical na face de arriba, por exemplo uma fratura vertical, existiria um desfaseamento de 23 μ m entre a imagem da morfologia na linha superior e na linha mais inferior. Este desfaseamento corresponde a 0.35 m na morfologia da arriba simplificada aqui apresentada, concluindo-se que o obturador de rolamento poderá tratar-se de uma das principais fontes de erro do método.

De forma a tentar avançar nesta temática, foi realizada uma parceria com a Força Aérea Portuguesa, no âmbito do exercício REP14, em 2014. O REP 14 é um exercício conjunto da Marinha, do NATO Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE) e da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) (Silva, 2014). Com o objetivo de testar a utilização de um VANT e a gravação de um vídeo ao longo das arribas, agora com uma câmara GoPro Hero 3, foi realizado um voo na costa oeste portuguesa, entre Santa Cruz e Peniche. O voo foi realizado em Outubro de 2014. Na primeira análise do vídeo verificou-se que tanto a velocidade do VANT como a distância às arribas foram adequadas à captação das faces das arribas. No entanto, devido às muito más condições meteorológicas que se verificaram na altura do voo, e a alguma interferência do motor do VANT, a gravação apresentou distorções muito significativas e foi impossível trabalhar este produto fotogrametricamente

6. Suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas

Existe na literatura uma vasta quantidade de trabalhos em que são executados inventários de movimentos de vertente e, com os resultados, é realizada a modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos, representando esta a probabilidade de um movimento ocorrer com base nas condições do terreno, ou seja, uma estimativa de *onde* um movimento irá ocorrer. Trata-se apenas da componente espacial de uma análise de perigosidade, não havendo lugar à determinação das componentes *temporal*, *frequência* ou *magnitude* de um movimento (Guzzetti, 2005). A modelação e avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos podem ser realizadas por diferentes métodos e técnicas.

No caso do litoral, os primeiros trabalhos de deteção de alterações na paisagem baseavam-se quase exclusivamente na comparação de documentos cartográficos, a diferentes escalas e de diferentes datas, com uma extensa componente de verificação no campo. Esta abordagem era complementada com dados de fotografia aérea, onde por observação estereoscópica se podem observar essas alterações. Trata-se de uma abordagem que, para litoral arenoso ou rochoso de recuo rápido, permite alcançar os objetivos de um estudo de monitorização do litoral, ainda que com uma precisão mais reduzida comparativamente às técnicas mais recentes.

Durantes os primeiros anos do séc. XXI, alguns trabalhos à escala local foram realizados com base em fotogrametria multi-temporal, e apenas em segmentos de erosão rápida, quase paralela à costa, com o objetivo de determinar taxas de recuo.

Nos últimos anos, com inventários multi-temporais robustos produzidos à escala regional para o litoral do Algarve central com base em fotogrametria aérea multi-temporal e métodos simplificados (Marques, 2006a), foi possível evoluir de estatísticas clássicas frequencistas para métodos estatísticos que se verificam ser mais adequados para a modelação da suscetibilidade devido à complexidade inerente ao ambiente em estudo (Marques *et al.*, 2011; 2013).

Esta informação, normalmente registada em bases de dados SIG, permite, como referido, a compilação de um inventário muito rico, quer do ponto de vista geométrico, com registo de áreas perdidas, comprimentos de arriba afetados, por exemplo, com dados da morfometria do terreno (altura da arriba, declives, curvaturas, etc.), quer do ponto de vista qualitativo, com registo de litologia, estrutura do maciço rochoso, existência e natureza de proteção de sopé, entre outros. No entanto, todos os dados são representados planimetricamente e a modelação da suscetibilidade é realizada de forma homogénea ao longo de toda a face da arriba, que é tratada como um elemento unitário dentro de cada unidade de trabalho. Este pacote de dados serve de *input* para diferentes cálculos da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente baseados

em métodos estatísticos como o Valor Informativo (VI) (Yin e Yan, 1988), análise discriminante ou a Regressão Logística (RL).

Assim, até à data, os trabalhos realizados com a finalidade de produzir cartografia de suscetibilidade basearam-se na análise conjunta dos inventários de movimentos produzidos e os fatores geomorfológicos e ambientais, com a respetiva apresentação dos resultados pelos métodos já referidos, à escala regional.

Apresenta-se neste trabalho, pela primeira vez, um estudo local de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente baseado em métodos estatísticos, com as seguintes características inovadoras:

- Objeto de estudo: face de uma arriba rochosa irregular com elevada frequência de movimentos;
- Monitorização por fotogrametria terrestre num período de 15 anos;
- Em grande escala: assente em levantamentos fotogramétricos e cartografia de detalhe dos fatores de predisposição;
- “Unidades de terreno”: pontos 3D da nuvem de pontos (com resolução mínima de 10 cm) selecionados a partir da nuvem de pontos gerada por correlação automática de imagem (imagens do levantamento fotogramétrico);
- Dados: adquiridos sempre em base tridimensional e representados no mesmo formato;
- Processamento de dados: aplicação da regressão logística - método multivariado que permite a determinação da correlação entre os diferentes fatores de predisposição.

6.1. Zona de estudo

A arriba estudada corresponde ao setor Norte da praia de Ribeira de Ilhas (Figura 134), no concelho de Mafra. Trata-se de um segmento quase totalmente exposto ao regime de alta energia do Atlântico Norte, onde se verificam frequentes temporais e episódios de agitação marítima muito elevada de W e SW (Pires, 1989). A arriba Norte de Ribeira de Ilhas é atuada por valores médios de potência das ondas de 40 a 45 kW m⁻¹ yr⁻¹ (Marques, 2006b).

A estrutura geológica é considerada normal relativamente ao plano da arriba, pelo facto de estruturalmente as camadas sedimentares se encontrarem na horizontal. No extremo norte do sector, existe uma chaminé basáltica, e ao longo da face, diversos filões de rocha alterada e/ou não identificada. Em toda a extensão existem três litologias predominantes, da base para o topo: alternância de calcários margosos de 0.2 a 1 m de espessura, margas de espessura 0.5 a 2 m e duas camadas de arenitos no topo da arriba (Marques, 2006b).

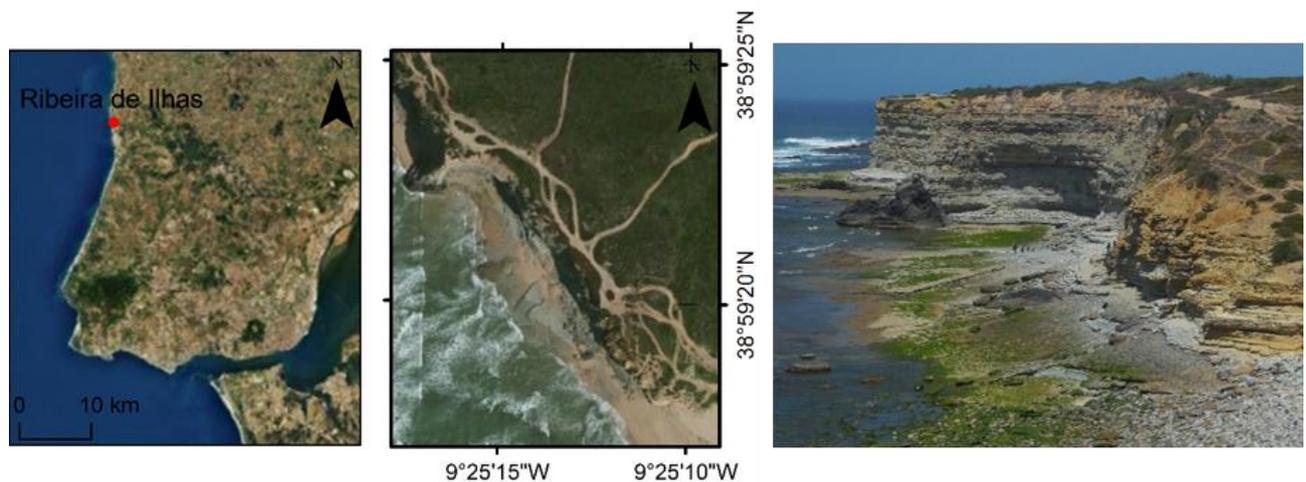


Figura 134 – Enquadramento da zona de estudo (fonte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community) e imagem panorâmica no local (S. Queiroz, 2011)

A arriba, de altura máxima de cerca de 30 m, assenta numa plataforma de abrasão muito extensa, que se desenvolve até perto da cota dos 4 m, e que é totalmente coberta pelo mar nos períodos de preia-mar. O perfil vertical é muito rugoso, observando-se, do topo para a base, uma zona menos declivosa onde se encontra o material mais alterado e, até à base, erosão diferencial em materiais de resistências distintas levam à formação de bancadas salientes, mais resistentes, em consola. Na base encontram-se detritos rochosos acumulados, resultado dos diversos movimentos de vertente que têm lugar por toda a face da arriba e que conferem alguma proteção ao sopé da arriba.

Relativamente a movimentos de vertente, por observação estereoscópica sistemática multitemporal de fotografia aérea (1947 a 2010), foram contabilizados 5 movimentos que afetaram a crista da arriba e provocaram recuos de 1 a 3 m, em extensões de 5 a 9 m. A área perdida estimada no topo da arriba foi de até 26 m². Em Marques (2006b) são apresentados os resultados da observação de 4 levantamentos fotográficos terrestres, realizados entre 1999 e 2003. Foram identificados na face da arriba 103 pequenos movimentos de natureza planar e tombamentos seguidos de queda de blocos, distribuídos ao longo de todo o segmento.

6.2 Monitorização por fotogrametria terrestre analógica e digital: 1999 a 2014

6.2.1 Recuperação da geometria de fotografias analógicas

No conjunto de bibliografia pesquisada, apenas Marques (2006b) apresenta um trabalho à escala local visando três arribas rochosas na costa oeste portuguesa. Os dados relativos a movimentos na face da arriba são obtidos com base em fotografia terrestre e com eles é realizado um inventário. Apesar do inventário ser muito rico, do ponto de vista geométrico e de caracterização dos maciços, os dados foram recolhidos com base em levantamentos fotográficos sistemáticos e estereoscópicos da face da arriba, com o apoio de um metro graduado como escala, recorrendo a métodos simplificados e observação estereoscópica. As taxas de recuo foram determinadas, e, em cada ponto de obtenção das imagens foi ainda obtida uma fotografia adicional

com o eixo oblíquo à anterior para estimativas da espessura média dos blocos movimentados e de volumes deslocados (Marques, 2006b).

Estando na presença de uma monitorização com base em imagens terrestres ao longo de um período de cerca de 15 anos (1999-2014), situação que se pode considerar única até à data, foram realizados testes para verificar qual a possibilidade de utilizar levantamentos fotográficos terrestres analógicos mais antigos, não fotogramétricos mas ainda assim estereoscópicos, para a monitorização de movimentos em arribas por fotogrametria terrestre digital.

De acordo com Boak e Turner (2005), a grande maioria das fotografias terrestres da costa são muito oblíquas, com informação muito limitada sobre escala ou pontos de controlo. Por este motivo, estes dados são de valor limitado para a aplicação de métodos quantitativos de cartografia da evolução da linha de costa. No entanto, como referido, as características dos levantamentos fotográficos realizados poderiam permitir a recuperação de informação métrica respeitante à data da obtenção das imagens.

Foram então recuperados os negativos de fotografias obtidas nas datas de 16-01-1999, 01-08-2000 e 07-08-2003, cobrindo-se assim um período de 4 anos. Estes foram digitalizados com uma resolução de 1200 dpi num *scanner* fotográfico Epson Perfection V750, utilizando o suporte específico para digitalização de negativos, de forma a obter-se a melhor planificação possível. Automaticamente foram convertidos em positivos digitais em formato TIFF. De forma a atualizar a informação que se poderia vir a compilar, foi realizado um novo levantamento a 19-03-2014, já digital (Tabela 13).

Tabela 13 – Informação sobre câmara utilizada em cada levantamento e número de fotos a incluir no processamento fotogramétrico.

Data do levantamento fotográfico	Câmara utilizada	Número de imagens a processar
16-01-1999	Analógica (negativo sobre filme)	9
01-08-2000	Analógica (negativo sobre filme)	8
07-08-2003	Analógica (negativo sobre filme)	7
19-03-2014	Digital –Nikon D80	42

O processamento fotogramétrico de imagens, analógicas ou digitais, passa sempre pela determinação da relação entre a informação da imagem e a geometria do objeto, que é estabelecida pelos parâmetros de orientação interna e externa. Tipicamente, as etapas consistem na recolha de informação sobre o objeto (pontos fotogramétricos), medição de coordenadas na imagem para determinação da orientação primitiva entre imagem e objeto, cálculo das orientações interna e externa e, finalmente, reconstrução do objeto – novos pontos e elementos geométricos – com base nas imagens orientadas (Luhmann *et al.*, 2014).

Normalmente, a orientação interna de uma câmara, isto é, a determinação dos parâmetros fundamentais que definem a posição espacial do centro de perspetiva e dos parâmetros que descrevem os desvios para o modelo da perspetiva central, é calculada pelo processo de calibração. Para câmaras métricas, a calibração é um processo muito controlado, realizado em fábrica. Para câmaras *standard*, sem marcas fiduciais ou possibilidade de reconstrução dos cantos das imagens, utilizadas em projetos em que se requer elevada precisão, o processo de calibração pode ser realizado de duas formas (Luhmann *et al.*, 2014):

- Previamente ou após um levantamento fotográfico com a câmara, usando um campo de calibração com alvos (pontos objeto) de coordenadas conhecidas do *software* em que o ajustamento é calculado;
- Estando perante um levantamento do qual se desconhece a câmara utilizada ou, conhecendo-a, havendo a possibilidade de ter havido mutação de lentes, re-focagens ou qualquer alteração na geometria da câmara, recorrendo a um ajustamento espacial baseado em pontos conhecidos do objeto que determina, simultaneamente, a orientação interna e externa. Perante esta possibilidade, cada imagem do levantamento tem de ser calibrada individualmente.

No caso concreto deste trabalho, a informação sobre as câmaras utilizadas nos levantamentos era muito insuficiente - apenas se sabe que a câmara utilizada nos levantamentos de 1999 e 2003 foi a mesma: SLR de 35 mm, com uma objetiva fixa macro de distância focal 55 mm, não calibrada (Marques, 2006b), e não se pôde garantir que aspetos como a focagem e *zoom* não tenham sido alterados de uma fotografia para a seguinte, dentro de um mesmo levantamento.

Assim, foi necessário considerar, para efeitos de processamento fotogramétrico, que cada fotografia foi capturada com diferentes configurações da câmara e, portanto, como referido, cada imagem carece de uma calibração individual. Este cálculo é baseado nas relações projetivas, sendo que o método mais usado, e aqui aplicado, é a Transformação Linear Direta (DLT): com um mínimo de 6 pontos não coplanares de coordenadas XYZ conhecidas a orientação interna e externa das imagens é determinada.

Num ajustamento com a orientação interna conhecida, são necessários 3 pontos de coordenadas terreno XYZ conhecidas para, aplicando as equações de colinearidade linearizadas, se determinar os 6 parâmetros de orientação externa da imagem ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$). Quando os parâmetros de orientação interna são desconhecidos, o número de incógnitas aumenta para 9 ou mesmo 11, contando com as componentes de distorção: $c, x'_0, y'_0, \Delta x', \Delta y'$. Assim, são requeridos, por imagem, 6 pontos, bem distribuídos, não coplanares, de coordenadas XYZ conhecidas para que o ajustamento determine as orientações interna e externa de cada imagem (Luhmann *et al*, 2014).

A recuperação da orientação das fotografias analógicas foi conseguida com base em pontos fotogramétricos coordenados no terreno com uma estação total *reflectorless*. Para tornar o fluxo de trabalho mais eficiente, todos os pontos fotogramétricos definidos figuravam como pontos conspícuos em todos os levantamentos, tendo como base o levantamento fotogramétrico terrestre digital realizado a 19-03-2014. Foi registado um conjunto de pontos fotogramétricos comuns aos 4 levantamentos (Figura 135), 6 dos quais servem apenas para a georreferenciação do levantamento de 2014, por cobrir uma área maior que aquela coberta pelos levantamentos anteriores. Este conjunto foi recolhido por observação sistemática pormenorizada e comparativa de todas as fotografias a processar.



Figura 135 – Pormenor de um ponto imutável ao longo do período de análise, comum às 4 épocas de observação, definido como ponto fotogramétrico e coordenado no terreno.

Os pontos fotogramétricos encontram-se distribuídos ao longo de toda a fachada de interesse, de acordo com a necessidade de existir um mínimo de 6 pontos por fotografia e de forma a poderem ser usados para a georreferenciação do levantamento de 2014.

A tarefa de definição de pontos comuns em 4 levantamentos distintos, separados temporalmente cerca de 15 anos demonstrou-se complexa em duas secções críticas da fachada da arriba, onde ocorreram movimentos de grande dimensão que afetaram a arriba praticamente em toda a sua altura. Nesses locais, a identificação de pontos comuns nas imagens foi árdua e apenas foi possível registar o número mínimo referido.

No terreno, um conjunto de 6 pontos levantou algumas dúvidas quanto à sua verdadeira localização devido a alterações ocorridas na fachada da arriba. Verificou-se, numa segunda campanha efetuada em Agosto de 2014, que alguns dos pontos medidos na primeira campanha (Julho 2014) tinham mesmo desaparecido com pequenas quedas de blocos na fachada da arriba, pelo que se conclui que, muito provavelmente, entre o levantamento fotogramétrico digital (Março de 2014) e a campanha de coordenação topográfica (Julho 2014) algumas formas da fachada se tenham alterado, ainda que de forma pouco perceptível à vista no terreno. Poder-se-ão ter medido pontos muito semelhantes mas que, na prática, não correspondem aos pontos comuns detetados previamente no planeamento, havendo assim lugar a pequenos erros de identificação e medição dos pontos de interesse.

Foi então realizada nova tentativa de localização de pontos comuns entre os levantamentos fotográficos, tendo-se registado mais pontos de controlo, que foram coordenados no terreno e recoordenados os 6 pontos problemáticos. O total de pontos registados e coordenados foi de 41.

Tendo um conjunto de pontos coordenados no terreno disponível, foi iniciado o processamento fotogramétrico dos levantamentos.

6.2.2 Processamento fotogramétrico dos levantamentos fotográficos

Utilizando os pontos fotogramétricos registados, foi possível recuperar a orientação espacial de algumas imagens pela aplicação do processo de DLT.

Para cada par estereoscópico foi criado um projeto individual no programa PhotoModeler Scanner e, utilizando os 6 pontos necessários, a orientação espacial das imagens foi determinada e foi gerada uma nuvem de pontos 3D da face da arriba representada no par.

Uma primeira tentativa de recuperar a orientação da totalidade das imagens dos levantamentos dos anos 1999, 2000 e 2003, em fiada, falhou devido à fraca sobreposição longitudinal das imagens. No caso do levantamento de 2003 (Figura 136) facilmente se observa que a cada 3ª imagem, deixa de haver qualquer sobreposição entre modelos estereoscópicos. Um exercício simples de medição de sobreposição entre as imagens desta fiada permitiu verificar que a sobreposição entre imagens se encontra entre os 30 e os 50%, impedindo por isso o ajustamento em fiada.

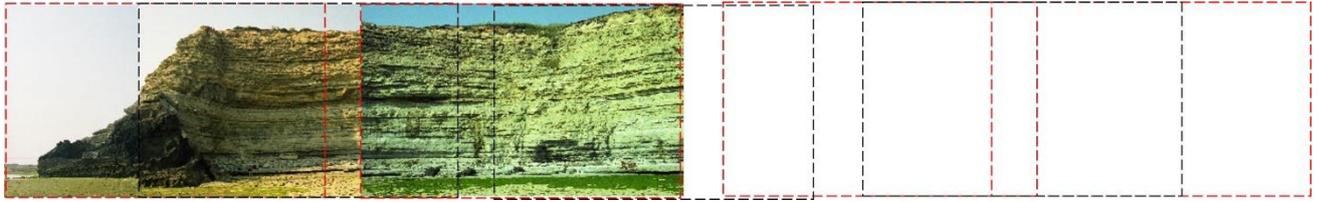


Figura 136 – Exemplo de enquadramento das imagens na fiada do levantamento de 2003: os limites das imagens estão representados a tracejado vermelho intercalado com tracejado preto em imagens sequenciais..

Para o levantamento datado de 1999, foi possível recuperar a orientação espacial de dois pares estereoscópicos e com eles gerar uma nuvem de pontos. No entanto, a falta de sobreposição já referida gerou uma lacuna de informação entre estes pares (Figura 137). Esta falta de informação e, especialmente, não se poder verificar se a ligação entre as nuvens geradas em projetos distintos é de boa qualidade, fez com que a nuvem final, resultante da união das duas nuvens individuais, não fosse contemplada para posterior produção de informação.

O levantamento datado de 2000, eventualmente realizado com uma outra câmara desconhecida, de pior qualidade, foi processado fotogrametricamente mas verificou-se que o ajustamento não era correto na maioria dos pares (Figura 138). Em alguns pares não foi de todo atingida convergência no ajustamento ou os resíduos eram totalmente inaceitáveis, pelo que se abandonou este levantamento para ações futuras.

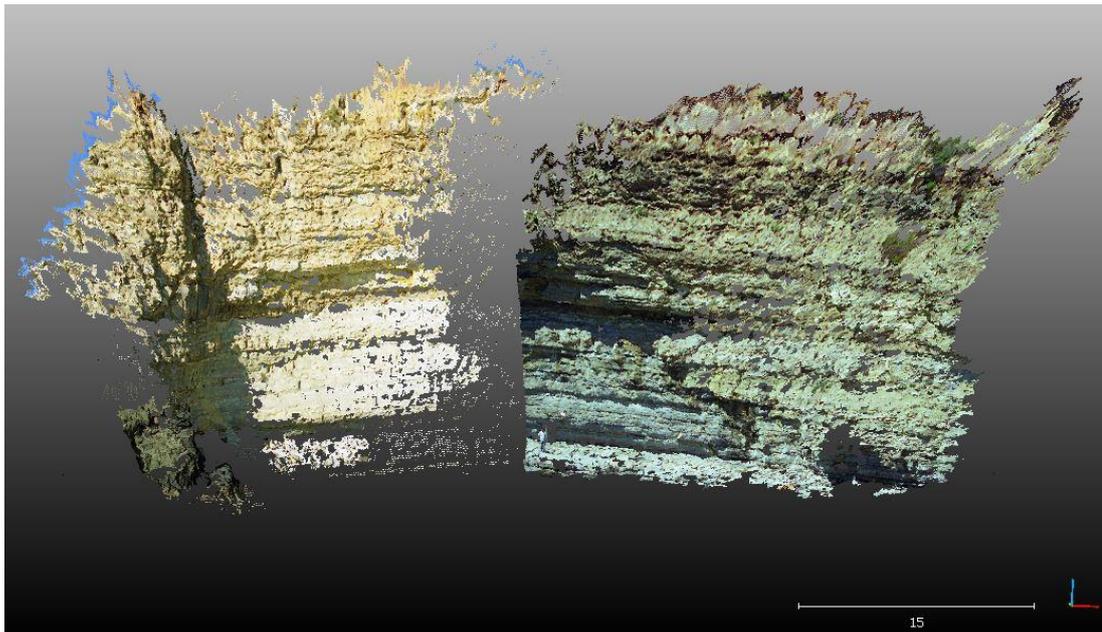


Figura 137 – Nuvens de pontos de 1999 com lacuna de informação entre pares estereoscópicos que lhes deram origem.

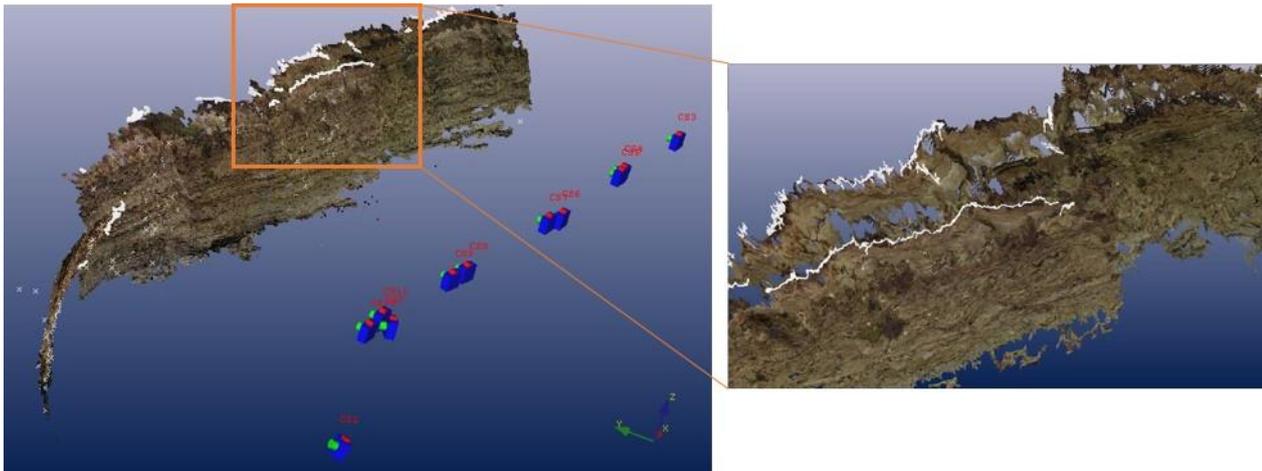


Figura 138 – Nuvens de pontos de 2000: à esquerda - nuvem final, resultante da união das nuvens individuais; à direita - pormenor do desfazamento entre duas nuvens de pontos 3D correspondentes à mesma zona da face da arriba.

Do levantamento fotográfico de 2003, foram processados 3 pares estereoscópicos. Os primeiros dois pares puderam ser processados no mesmo projeto, e o 3º foi processado num projeto individual uma vez que não havia ligação possível aos anteriores. Foram geradas 2 nuvens de pontos que se uniram numa nuvem final para comparação com a situação em 2014.

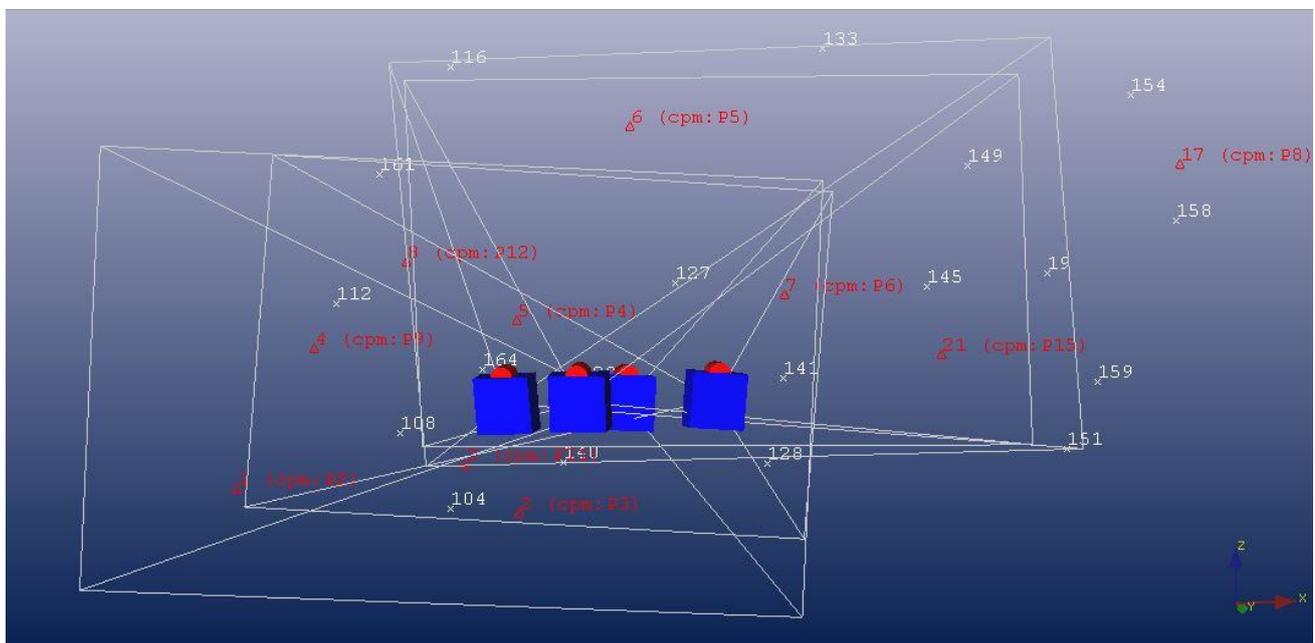


Figura 139 – Pares processados de 2003: Esquema da posição da câmara, limites das imagens já orientadas e distribuição dos pontos fotogramétricos.

O processamento das imagens de 2014, tratando-se de um levantamento fotogramétrico terrestre adequado, não apresentou dificuldades. A calibração da câmara foi realizada após o levantamento, em gabinete, utilizando o padrão de calibração do *software* PhotoModeler Scanner. As 42 imagens foram orientadas em

conjunto com recurso a 11 pontos fotogramétricos e foram geradas nuvens de pontos 3D para toda a extensão da arriba Norte de Ribeira de Ilhas.

Em suma, foi realizado o processamento fotogramétrico de dois pares do levantamento fotográfico de 1999, de 3 pares de 2003 e do levantamento fotogramétrico de 2014, que permitiu gerar nuvens de pontos, totalizando assim 3 épocas de observação da arriba Norte da praia de Ribeira de Ilhas (Tabela 14).

Tabela 14 – Resultados finais do processamento fotogramétrico e geração de nuvens de pontos.

Data do levantamento	Erro total final	Nuvens de pontos
6-01-1999	1.17 e 2.69	2 pares ≈ 1.6 milhões de pontos
07-08-2003	2.64 e 2.61	3 pares ≈ 2.6 milhões de pontos
19-03-2014	1.05	≈ 34 milhões de pontos

As nuvens de pontos 3D referentes a 2003 e 2014, esta última segmentada para corresponder à mesma extensão geográfica que a nuvem de 2003, foram comparadas no *software* CloudCompare, utilizando o algoritmo M3C2 (Lague *et al.*, 2013). Na definição dos parâmetros, optou-se por indicar um erro de registo (ou erro associado à precisão da nuvem) de 0.5 m, devido à incerteza associada à nuvem de 2003. Foi ainda definida a utilização de *core points* por decimação da nuvem de 2014, visto que a resolução da nuvem a comparar – 2003 – é inferior. Resultou assim uma nuvem de 550 mil pontos, aos quais está associada a informação da alteração ocorrida entre uma época e outra.

Apesar de, devido à precisão associada à nuvem de 2003, não se poder garantir muito elevada precisão na magnitude das diferenças, verifica-se total concordância entre as zonas de perda de material e acumulação de material (Figura 140), de que é exemplo a queda de blocos a meia arriba (caso a) e o grande movimento ocorrido onde se localizava uma sapa (caso b). Neste caso, devido à orientação do cálculo, as perdas de material estão afetadas do sinal positivo e as acumulações de material de sinal negativo. O caso b é extremamente explícito: em redor da sapa e na zona superior, até ao topo da arriba, verifica-se que o material se deslocou causando alterações na face da arriba na ordem dos 1.5 a 2 m; no local da sapa, houve acumulação de material caído até cerca de 2.5 m.

6.2.3 Discussão

A falta de calibração da câmara na ocasião dos levantamentos mais antigos gerou as maiores dificuldades neste processo. Considerando que esta arriba apresenta uma frequência muito elevada de movimentos ao longo do tempo, a deteção de pontos comuns entre levantamentos que distam até 15 anos foi uma tarefa morosa e exigindo enorme detalhe na observação da morfologia da face.

O processamento individual de cada par de um mesmo levantamento facilitou a falta de coerência entre nuvens de pontos espacialmente consecutivas, uma vez que não havia uma fiada sequencial de imagens onde a orientação relativa pudesse ser realizada previamente através de pontos de ligação comuns.

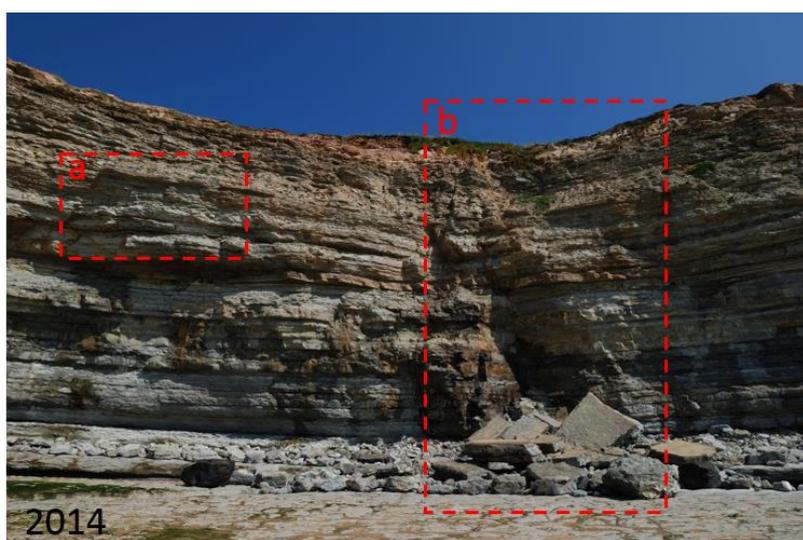
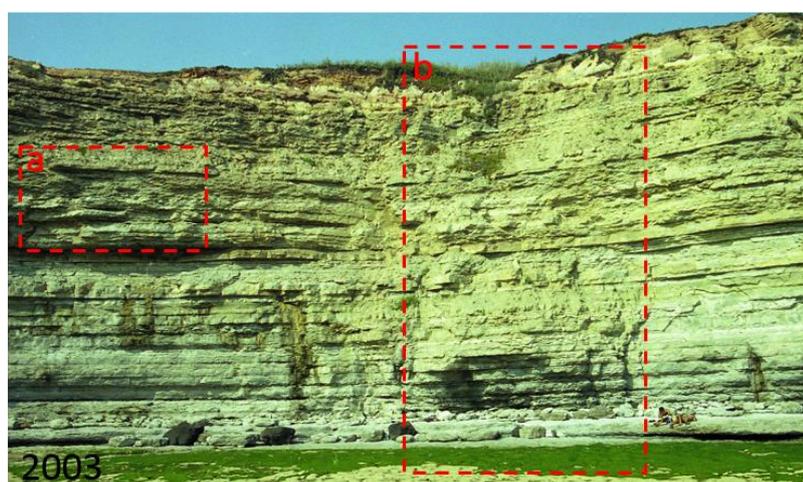
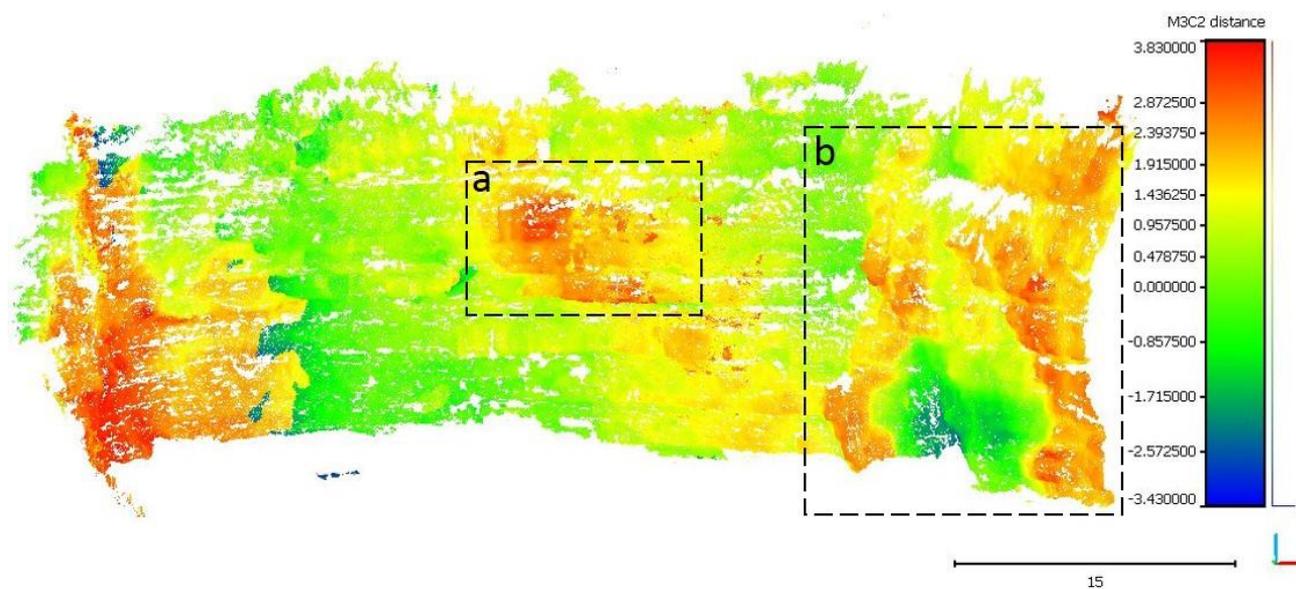


Figura 140 – Em cima: nuvem de pontos 3D classificada de acordo com as diferenças calculadas entre 2003 e 2014 com o algoritmo M3C2 (caso a e caso b); Ao centro e em baixo: diferenças observáveis nas imagens RGB das duas épocas.

A necessidade de utilizar 6 pontos fotogramétricos por imagem de forma a orientar interna e externamente as imagens impossibilitou a verificação da qualidade dos ajustamentos realizados com base em pontos de controlo a usar como *check points*. O único indicador de qualidade do processo que se pôde utilizar foi o *sigma naught* do ajustamento fotogramétrico em cada par. Os valores apresentados para o processamento dos levantamentos analógicos indicam fraca qualidade nos ajustamentos realizados, uma vez que este valor, para projetos de elevada precisão, deverá ser cerca de 1.

Foi colocada a hipótese de realizar o registo das nuvens antigas utilizando como base a nuvem fotogramétrica de 2014, à semelhança do procedimento descrito na secção 5.4.2. No entanto, estas nuvens são muito limitadas no espaço, relativamente à de 2014, e devido à elevada frequência de alterações ao longo de toda a face da arriba, não seria expectável que o conjunto de pontos usados para a transformação espacial fossem de facto homólogos entre as nuvens a registar e a de referência, resultando numa orientação falseada.

Relativamente à comparação de nuvens de pontos, os problemas referidos impossibilitaram a utilização deste *output* para a obtenção de informação relativa à evolução da face da arriba no período de tempo até 2003. No entanto, foi possível avaliar a evolução entre 2003 e 2014.

Como referido, o objetivo dos levantamentos do trabalho de Marques (2006b) visava a observação estereoscópica de pares de imagens de forma a detetar alterações na face da arriba por observação com estereoscópio de mesa e apoiar a estimativa de medições com imagens extra obtidas da mesma posição mas com o eixo ligeiramente mais oblíquo relativamente à face da arriba. Não houve, portanto, lugar ao cumprimento dos requisitos necessários para que o levantamento se possa considerar fotogramétrico, e que com este exercício se verifica serem fundamentais: bases mais pequenas para garantir sobreposição e evitar oclusões – medição de pontos de ligação e de controlo em mais do que 2 imagens sequenciais, algumas imagens convergentes para fortalecer o ajustamento da fiada e maior escala das imagens para maior pormenor e resolução no cálculo das nuvens de pontos.

6.3 Modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente

6.3.1 Método de Regressão Logística

Na literatura referente à modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente é muito frequente a aplicação de modelos de base estatística, nomeadamente o método do valor informativo (VI) e a regressão logística (RL), uma das técnicas mais populares de classificação da probabilidade espacial de ocorrência de movimentos (Guzzetti, 2005). Em Portugal, são vários os trabalhos que apresentam a modelação da suscetibilidade baseada no VI (Marques, 2013, Marques *et al.*, 2013). De acordo com Marques *et al.* (2013), este método permite uma análise objetiva da suscetibilidade apenas com base na distribuição espacial de cada fator de predisposição (variáveis), de forma bi-variada, característica pela qual não se consegue determinar correlações que possam existir entre diferentes fatores.

Já a aplicação de métodos estatísticos baseados em regressão categorial permitem ultrapassar esta barreira e vários trabalhos vieram já demonstrar que a sua aplicação gera melhores resultados (Marques, *et al.*, 2013; Marques, 2013). Guzzetti (2005) refere ainda a vantagem da regressão pela possibilidade de utilizar um

conjunto de diferentes variáveis, contínuas, binárias ou categóricas, sendo estas últimas muito comuns nos estudos geológicos e geomorfológicos.

Marôco (2014) refere que o termo “regressão” pode ser definido como um conjunto vasto de técnicas estatísticas usadas para modelar relações entre variáveis e predizer o valor de uma variável dependente a partir de um conjunto de variáveis independentes (ou preditoras).

A regressão logística é um caso de regressão categorial que melhor se aplica à análise da suscetibilidade à ocorrência de movimentos uma vez que esta variável, que é a dependente, é dicotómica ou binária – o movimento ocorre (1) ou não ocorre (0) (mutuamente exclusiva). Esta tipologia faz com que a regressão logística seja a melhor técnica a aplicar para modelar, em termos probabilísticos, uma das duas realizações das classes da variável dependente e avaliar a significância de cada uma das variáveis independentes no modelo, utilizando um modelo de relação curvilíneo (ou *S-shaped*).

Nesta técnica, a resposta é a presença/ausência de um movimento numa dada unidade de terreno, e as variáveis independentes são o conjunto de fatores ambientais descritos para cada uma das unidades de terreno. Esta relação entre a ocorrência de movimentos numa unidade de terreno e a sua dependência dos fatores é dada pela equação (43) (Hosmer e Lemeshow, 2000):

$$S = \frac{1}{(1+e^{-\psi})} \quad (43)$$

onde S representa a probabilidade de uma unidade de terreno (r) pertencer ao grupo “instável”, grupo com movimentos de vertente, e cujos valores variam entre 0 e 1.

ψ é o *logit*, ou o logaritmo natural das *odds* $\left(\frac{p}{1-p}\right) = \frac{\text{probabilidade de ocorrência}}{\text{probabilidade de não ocorrência}}$ (Eq. 44), que se relaciona com as variáveis independentes da seguinte forma (Eq. 45):

$$\psi = \text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 v_1(r) + \beta_2 v_2(r) + \dots + \beta_m v_m(r) + \varepsilon \quad (45)$$

onde β_0 é o termo de referência quando nenhuma variável é incluída no modelo, β_i com $i=1, \dots, m$ são os termos desconhecidos do modelo de regressão (“pesos” ou coeficientes de ponderação), v_i são os valores das i variáveis independentes ou fatores de predisposição e ε o erro associado à linearização. Como os valores de β são difíceis de interpretar diretamente (Marôco, 2014), é usual representar a exponencial destes coeficientes, ou o rácio das *odds* (OR) (Eq. 47), que representa como as *odds* mudam com o aumento de uma unidade numa variável mantendo as restantes variáveis constantes. O *logit* transforma a curva em S numa reta (reta de regressão), $\psi(p) = a + bx$ (sendo $a = \beta_0$ - e $b = \beta$ - parâmetros obtidos estatisticamente), e portanto:

$$\left(\frac{p}{1-p}\right) = e^{(a+bx)} \quad (45)$$

$$p = \text{probabilidade de ocorrência} = \frac{e^{(a+bx)}}{1+e^{(a+bx)}} \quad (46)$$

$$OR = e^b = \frac{e^a e^{b(x+1)}}{e^a e^{bx}} \quad (47)$$

6.3.2 Processamento de dados: atribuição de informação alfanumérica à nuvem de pontos 3D

Existem diversas formas para avaliação e produção de mapas de perigosidade de instabilidades em vertentes (Frattini *et al.*, 2010), com diferenças operacionais e conceituais tanto ao nível das unidades de terreno, como das ferramentas de análise e construção desses modelos.

Neste trabalho aborda-se a determinação da probabilidade de ocorrer uma instabilidade numa dada arriba, ou seja, a suscetibilidade, que pode ser ponderada utilizando métodos estatísticos para correlacionar as condições locais do terreno, designadas por fatores de predisposição, com as instabilidades inventariadas (Brabb, 1984; Carrara, 1993; Soeters e Van Westen, 1996).

Existem três componentes de dados que têm de ser consideradas para a modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos com base estatística: as unidades de terreno, o inventário de movimentos (variável dependente) e os fatores de predisposição (variáveis independentes).

6.3.2.1 Unidades de terreno

De acordo com Guzzetti (2005) as principais diferenças na execução de mapas de suscetibilidade resultam da definição de três fatores: escala de trabalho, unidades de terreno e metodologia utilizada.

A escala de trabalho está diretamente relacionada com o objetivo do estudo, a extensão da área de estudo e a disponibilidade de informação de base, e condiciona a metodologia de cálculo da suscetibilidade (Marques, 2013). As metodologias baseadas em métodos estatísticos, mais ou menos complexos, deverão ser aplicadas a estudos a escalas grandes, onde o maior detalhe da informação permita uma análise e avaliação mais pormenorizada na região. Por isso também as unidades de terreno, ou unidade de trabalho, serão variáveis.

Guzzetti (2005) apresenta de forma bem desenvolvida as diferentes unidades de trabalho, onde se inserem as “unidades de terreno”. Segundo Marques (2013), a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, com base em métodos estatísticos/probabilísticos utiliza como unidades de terreno as unidades morfo-hidrográficas e as unidades matriciais, sendo estas últimas, com as ferramentas de análise espacial disponíveis nos *software* SIG, as mais apropriadas para a análise da suscetibilidade (Carrara *et al.*, 1995).

De acordo com Marques *et al.* (2013), no caso do litoral rochoso de arriba, a utilização do pixel como unidade de terreno apresenta desvantagens devido à morfologia em questão, e em especial porque a estabilidade da arriba depende dos fatores de predisposição presentes ao longo de toda a face e não numa base pixel-a-pixel.

Como referido na Introdução, foi pretendido testar se os pontos tridimensionais da nuvem de pontos original obtida por processamento fotogramétrico terrestre poderiam funcionar como unidades de terreno individuais. A nuvem original representativa de toda a extensão da arriba em estudo contém cerca de 34 milhões de pontos 3D, com uma resolução espacial de 2 a 5 cm, aos quais está associada informação RGB. Constatou-se neste trabalho que, do ponto de vista computacional, um ficheiro desta dimensão é apenas passível de ser usado para visualização e aquisição fina de dados sobre a face da arriba, não sendo gerível tal quantidade de informação na fase de análise espacial e atribuição de informação alfanumérica ponto a ponto. Por este motivo, foi necessário, antes de qualquer processamento dos dados, decimar a nuvem de forma a torná-la manejável pelo *software* SIG utilizado (ArcGIS). Esta decimação foi efetuada no *software*

CloudCompare, impondo uma distância entre pontos de cerca de 10cm, obtendo-se uma nuvem de cerca de 0.5 milhões de pontos (nuvem de referência), sendo cada ponto considerado uma unidade de terreno.

6.3.2.2 Inventário de movimentos

Relativamente ao inventário de movimentos, como referido, ele é constituído por 90 movimentos, ocorridos entre 1999 e 2014. Todos os movimentos foram registados com base em interpretação visual de imagens comparada com a nuvem de pontos original obtida por fotogrametria terrestre e delimitados tridimensionalmente em cima desta. Desta forma, foi possível registar informação adicional sobre a área tridimensional da zona da face da arriba por eles afetada. De um total de 406981 pontos 3D da nuvem de referência, 50492 estão afetados por movimentos, representando 12.4% da área em estudo.

Todos os movimentos foram classificados como quedas de blocos devido à geometria da face da arriba, das litologias presentes e dos detritos – blocos - observáveis na base.

6.3.2.3 Fatores de predisposição

Tendo em consideração a escala muito local a que este estudo se refere e ao objetivo de aplicar um modelo de base estatística à região, os fatores de predisposição à ocorrência de movimentos analisados foram: litologia, falhas, escorrência de água, proteção de sopé, cotas, declive e rugosidade.

A informação relativa à caracterização da face da arriba foi recolhida por edição manual 3D sobre a nuvem de pontos original. Todos os fatores foram definidos e calculados com o maior nível de detalhe possível, tendo em conta a escala a que se trabalhou (Figura 141, pág. 159).

No entanto, os primeiros resultados da análise estatística (Caso 1) indicaram que o modelo não se ajustava aos dados e revelaram que nenhum dos fatores contribuía de forma efetiva para a ocorrência de movimentos. Concluiu-se assim que o detalhe e discriminação dos fatores de predisposição não seriam suficientes para explicar o fenómeno, à escala a que este está a ser estudado.

Assim, foi realizado trabalho adicional (Caso 2) para a definição de novos fatores - resistência dos materiais (distâncias C2M) e exposição - e refinamento de alguns fatores já trabalhados, como a seguir se descreve:

o Cotas

Os dados relativos às cotas correspondem, obviamente, à componente vertical do objeto (Z). A classificação dos valores de cota ao longo da face da arriba foi feita por quantis de forma a garantir uma frequência semelhante em cada classe.

o Litologia

A interpretação da nuvem de pontos permitiu dividir a face da arriba, numa primeira fase, em arenitos, margas, calcários margosos e basalto. Esta subdivisão foi testada como variável preditora no modelo de RL e verificou-se ser de detalhe insuficiente para apresentar algum poder discriminante na previsão de movimentos. Assim, foram testadas formas indiretas de aumentar a diferenciação litológica.

Tendo em consideração que a variação da litologia se reflete na variação da resistência dos materiais, foi estudada a variação litológica através da variação em perfil, na vertical, da face da arriba, como indicador de resistência relativa (ver Caso 2).

○ Declives

Para se obter o mapa de declives da arriba, foi necessário gerar um modelo digital de terreno da face da arriba, com resolução espacial de 0.05 m, executado com o programa Quick Terrain Modeler. Este MDT foi calculado com base na nuvem original de 34 milhões de pontos de forma a se obter a melhor representação possível da topografia da face da arriba. Posteriormente foram calculados os declives, em graus, com a mesma resolução espacial, e esta informação foi exportada em pontos com resolução de 0.1 m, em formato ASCII onde a cada ponto XYZ corresponde um valor de declive. É importante sublinhar que o *software* não é capaz de calcular declives superiores a 90° : nas regiões onde há inversão do declive para “dentro” da arriba, como por exemplo, dentro de sapas ou quando a face da arriba se torna côncava. Nestes casos, o valor de declive foi assumido como 90° quando deveria ser superior a esse valor (ou inferior a 0°).

Foi feita a importação para ArcGIS, mas os pontos da nuvem de referência não coincidem com os pontos desta nuvem. Foi necessário rebater as coordenadas xz dos pontos deste ficheiro para o plano horizontal, criar um modelo matricial com célula de 0.05 m por interpolação dos valores de declive. Após rebater também a nuvem de referência, extraiu-se os valores do modelo matricial para os pontos. Após uma operação de junção espacial baseada no ID (identificação unívoca) dos pontos, os valores de declive foram associados a cada ponto da nuvem de pontos de referência.

No entanto, a aplicação desta metodologia causa dois problemas relevantes que afetam grandemente os resultados: a ausência de declives negativos quando eles existem e estão representados na nuvem, e o rebatimento de uma face muito côncava, em planta, adulterando os valores de declive por sobreposição, no plano horizontal, de zonas distintas da arriba. A primeira situação verifica-se pontualmente na arriba e verificar-se-á sempre que houver a formação de sapas ou na ocorrência de um movimento que não afete toda a extensão vertical da arriba e o topo se mantenha mais saliente; a segunda ocorrerá sempre que o desenvolvimento da arriba, em planta, não se faça de forma aproximadamente retilínea.

Esta situação foi corrigida num segundo exercício (ver Capítulo 4, secção 4.3.).

○ Rugosidade

O programa CloudCompare possui uma ferramenta que determina, para cada ponto, a rugosidade de uma nuvem de pontos através da análise da distância entre um ponto e o plano de melhor ajuste calculado com os vizinhos mais próximos, conjunto este definido pelo valor do raio da esfera de procura (*kernel*). Este cálculo foi realizado com a nuvem de referência, usando um *kernel* de 0.4 m, sendo apenas necessário realizar a mesma operação espacial de junção para introduzir o atributo “rugosidade”.

6.3.3 Modelação da suscetibilidade

A suscetibilidade foi modelada recorrendo ao *software* IBM SPSS Statistics que é um programa de estatística avançada que permite trabalhar bases de dados complexas, com grandes quantidades de informação, em diferentes formatos (folha de cálculo, ficheiros ascii, entre outros), disponibilizando diversos métodos estatísticos e testes de avaliação à qualidade dos modelos gerados. No caso deste trabalho, o SPSS foi utilizado para a aplicação do método de regressão logística binária.

Para a regressão logística a variável dependente é a ocorrência de movimentos, e os diferentes fatores de predisposição as variáveis independentes. A variável dependente está classificada como 1 - Sucesso (ponto afetado pela ocorrência de um movimento) ou 0 - Insucesso (ponto não afetado pela ocorrência de um movimento).

De forma a uniformizar os dados e não enviesar o sistema de “pesos”, os fatores quantitativos foram divididos em classes com uma frequência de unidades de terreno semelhante.

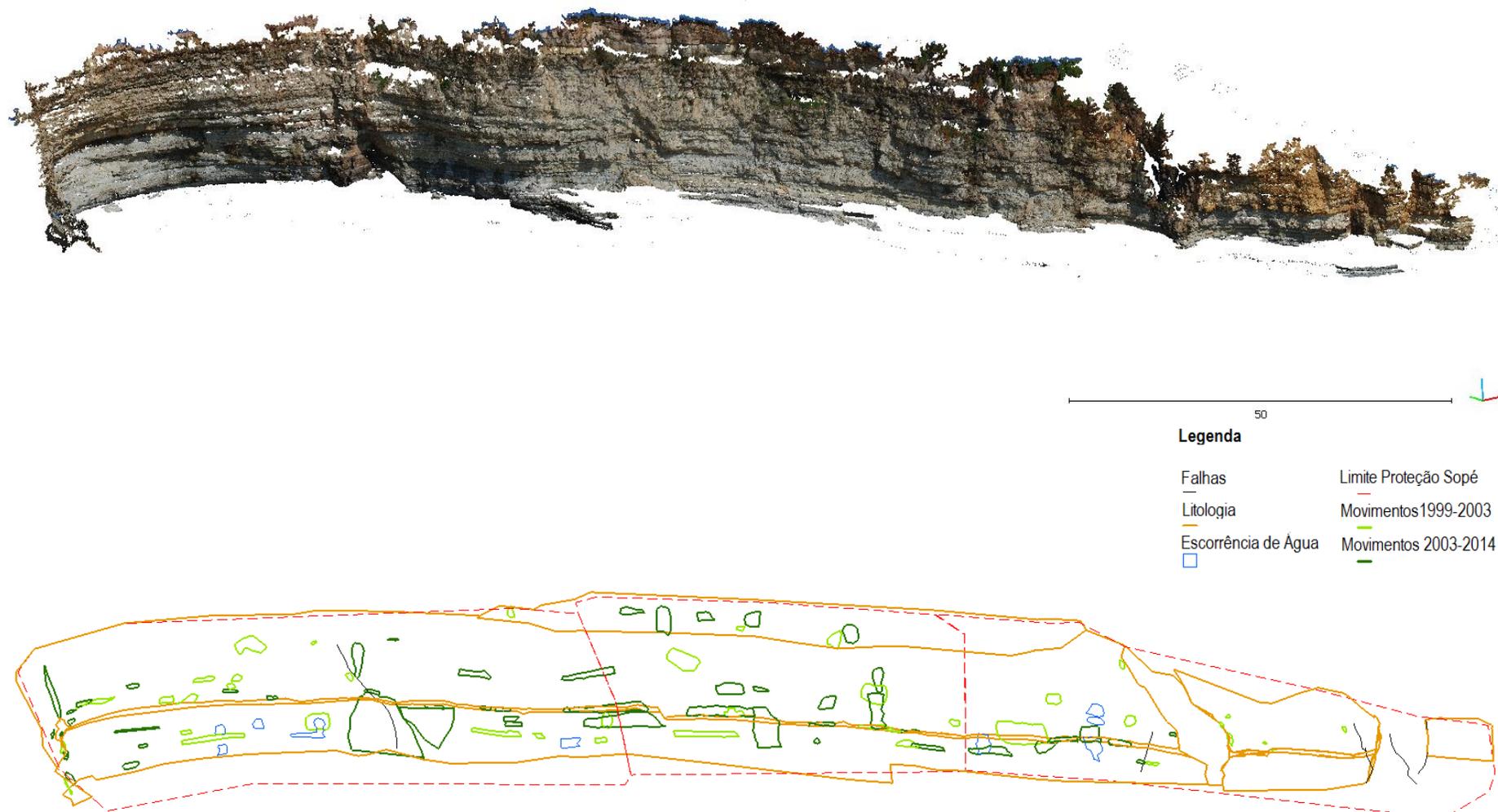


Figura 141 – Cartografia sobre nuvem de pontos 3D dos movimentos ocorridos entre 1999 e 2014 e dos fatores de predisposição (Trimble RealWorks).

➤ **Caso 1: Inventário de movimentos 1999-2014, nuvem de pontos 3D de 2014, fatores de predisposição iniciais**

Os dados de entrada para modelação da suscetibilidade foram classificados de acordo com a *Tabela 15*.

Tabela 15 – Classificação dos fatores de predisposição e correspondente percentagem na nuvem.

Fatores	Classes	Número de pontos
Litologia	1 - Arenitos	56287
	2 – Basalto	10969
	3 - Margas	201745
	4 - Calcários margosos	137980
Falhas	Presença (vs. Ausência)	Presença: 2267
Escorrência de água	Presença (vs. Ausência)	Presença: 4442
Proteção de sopé	1 – Blocos	289228
	2 – Plataforma abrasão	117753
Cotas	1 - [0 – 7.33[	67853
	2 - [7.33 – 10.21[	67892
	3 - [10.21 – 13.13[	67816
	4 - [13.13– 16.52 [	67843
	5 - [16.52 – 20.55[	67865
	6 - [20.55 – 29[	67711
Declive	1 - [0 – 70[	13676
	2 - [70 – 80[	18311
	3 - [80 – 85[	25928
	4 - [85 – 89.5[	181830
	5 - [89.5 – 90[	167213
Rugosidade	1 - [0 – 0.008[	44705
	2 - [0.008 – 0.021[	55573
	3 - [0.021 – 0.031[	81543
	4 - [0.031– 0.047[	63677
	5 - [0.047– 0.063[	46405

	6 - [0.063– 0.094[	53327
	7 - [0.094 – 0.367[	32883

A primeira análise estatística utiliza o método de seleção “Inserir”, do módulo Regressão Logística binária, que entra com todas as variáveis independentes em análise em conjunto para construir o modelo estatístico, numa só etapa.

O primeiro resultado – **Bloco 0: Bloco Inicial** - diz respeito à Tabela de Classificação (Tabela 16) que representa o modelo nulo, ou seja, o modelo sem entrar em consideração com as variáveis independentes, sendo que a probabilidade de ocorrência estimada é de 87.6% (β_0 foi estimado em -1.954). Por se considerar um valor de recorte de 0.5 e $S = 0.124$, o modelo não considera a ocorrência de “sucessos” – as observações foram classificadas como 0.

Tabela 16 - Tabela de Classificação^{a,b}

		Previsto		
		Movs		Percentagem correta
		0	1	
Etapa 0	Movs			
	0	356174	0	100,0
	1	50492	0	0,0
	Percentagem global			87,6

a. A constante está incluída no modelo.

b. O valor de recorte é 0,500

Os resultados que se seguem – **Bloco 1: Método = Enter** - dizem respeito ao modelo completo, ou seja, com a intervenção de todas as variáveis independentes.

Foram realizados testes aos coeficientes do modelo Omnibus (Tabela 17) tendo-se obtido valores de significância (*Sig.*) inferiores a 0.001, indicando que existe pelo menos uma variável independente com poder preditivo no modelo.

Tabela 17 - Testes de coeficientes de modelo Omnibus

		Qui-quadrado	df	Sig.
Etapa 1	Etapa	23304,190	21	0,000
	Bloco	23304,190	21	0,000
	Modelo	23304,190	21	0,000

Os testes de verossimilhança e R^2 (Tabela 18 a)) avaliam a qualidade do modelo do ponto de vista da sua “utilidade”, mas não devolvem diretamente a sua significância (*p value*). Os testes de R^2 de Cox & Snell e de Nagelkerke são duas estatísticas que avaliam essa qualidade. O teste de R^2 de Nagelkerke, por apresentar valores no intervalo de 0 a 1, é o mais utilizado para se poder analisar o quão útil as variáveis são na predição da variável dependente e, por isso, é muitas vezes referido como uma medida da “magnitude do efeito” (Bewick *et al.*, 2005). Quanto melhor o modelo, mais o valor de R^2 se aproxima de 1. O valor de R^2 de Nagelkerke no teste efetuado – 0.1 - indica que as variáveis não têm qualquer influência no modelo.

Por sua vez, o teste de Hosmer e Lemeshow (H_0 : o modelo ajusta-se vs. H_1 : o modelo não se ajusta) (Tabela 18 b)), que devolve a significância (Sig.), indica problemas no modelo: a significância calculada é inferior a $\alpha = 0.05$ indicando que o modelo não se ajusta aos dados.

Tabela 18 – a) Resumo do modelo

Etapa	Verossimilhança de log -2	R quadrado Cox & Snell	R quadrado Nagelkerke
1	281808,247 ^a	0,056	0,106

b) Teste de Hosmer e Lemeshow

Etapa	Qui-quadrado	df	Sig.
1	816,744	8	0,000

A Tabela de Classificação (Tabela 19, Tabela 20) apresenta os resultados práticos da aplicação do modelo: a classificação dos sujeitos observados e a prevista pelo modelo ajustado. Verifica-se não haver qualquer alteração na percentagem do modelo com introdução de variáveis para o modelo nulo, mais uma vez indicando a não influência das variáveis independentes no modelo.

Tabela 19 - Tabela de Classificação - Genérica

		Previsto		
		Movs		Percentagem correta
Observado	0	1		
	Etapa 1	Movs 0	Verdadeiro negativo (VN)	Falso positivo (FP)
1		Falso negativo (FN)	Verdadeiro positivo (VP)	
Percentagem global				

Os quatro casos que são apresentados na Tabela 19 podem ser explicados da seguinte forma (Guzzetti, 2005): VN - unidades caracterizadas por fatores que potenciam estabilidade e onde não foram observados movimentos; VP - unidades caracterizadas por fatores que potenciam instabilidade e onde foram observados movimentos; FP - unidades previstas como instáveis mas sem movimentos observados; FN - unidades previstas como estáveis mas com movimentos observados. O modelo ideal será aquele em que a soma de VN e VP totalizam 100% das unidades de terreno estudadas.

Portanto, FP e FN correspondem a unidades onde existe uma contradição entre o inventário e a previsão do modelo: FP - não foram observados movimentos por erro de inventariação ou não estavam presentes características que permitissem classificar as unidades como afetadas por movimentos (nestes casos, é necessária investigação adicional de campo e determinar as condições atuais de suscetibilidade); FN – movimentos ocorreram devido a fatores não considerados no modelo ou devido a erros nos dados de entrada.

Tabela 20 - Tabela de Classificação

		Previsto	
		Movs	Percentagem correta
Observado			

6. Suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas

		0	1	
Etapa 1	Movs 0	356175	20	100,0
	1	50453	39	0,1
Percentagem global				87,6

Uma forma de classificar o poder discriminante do modelo de regressão é através da determinação da área abaixo da curva (AAC) ROC (*Receiver Operating Characteristics*) (Tabela 21), calculada pelas probabilidades estimadas pelo modelo de dados, no SPSS, sendo que o modelo ideal apresenta uma AAC igual a 1 e um modelo aleatório apresenta uma AAC de 0.5 (Figura 142).

Esta curva é construída com base nos valores de VN, FN, FP e VP que se relacionam através da Especificidade (% de classificações corretas na classe 0: $VN/(VN+FP)$) e Sensibilidade (% de classificações corretas na classe 1: $VP/(VP+FN)$). O modelo obtido neste estudo forneceu uma AAC de 0.698 o que, segundo Marôco (2014), corresponde a um modelo com poder discriminante entre o “fraco” e o “razoável” (fraco: [0.5 – 0.7[e razoável: [0.7 - 0.8[) e, segundo a classificação de Guzzetti *et al.* (2005), aplicada especificamente a movimentos de vertente em terra, “fraco” (razoável: [0.75 – 0.8[).

Tabela 21 - Área sob a curva

Variável(eis) de resultado de teste: Probabilidade prevista

Área	Erro Padrão ^a	Sig. assintótico ^b	Intervalo de Confiança 95% Assintótico	
			Limite inferior	Limite superior
0,698	0,001	0,000	0,695	0,700

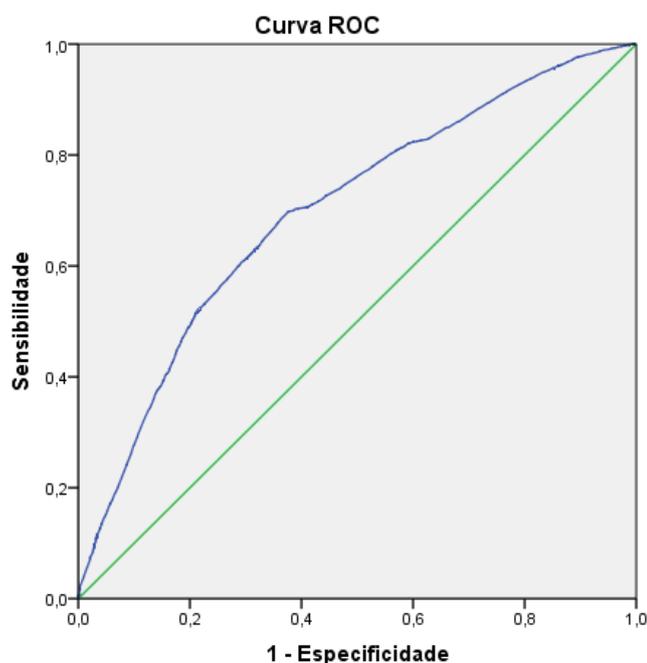


Figura 142 - Curva ROC do modelo produzido com a correspondente área abaixo da curva, para o Caso 1 (a verde, a reta para o modelo aleatório).

Para cada unidade de terreno é então calculada uma probabilidade prevista para a ocorrência de movimentos, que pode ser representada espacialmente classificando cada ponto com o valor de probabilidade correspondente. Para uma área abaixo da curva de 70%, a probabilidade calculada apresenta-se na Figura 146 (página 170).

➤ **Caso 2: Inventário de movimentos 1999-2014, nuvem de pontos 3D 2014, fatores de predisposição melhorados**

Tendo-se verificado um fraco ajuste do modelo estatístico aos dados, foi realizada, como referido, uma revisão dos fatores de predisposição. A elevada quantidade de FN indica que poderão existir fatores não considerados no modelo ou os fatores de entrada contém erros que afetam os resultados (Guzzetti, 2005).

O método de cálculo dos declives foi revisto, foram calculados os valores de exposição ao longo da arriba, registados, em sectores de 2m ao longo da arriba, os valores de cota da base da arriba, e ainda foi implementada a metodologia de classificação da resistência dos materiais (ver Capítulo 4, secção 4.3), função direta da litologia, de forma a detalhar melhor este fator.

○ *Cota da base da arriba*

A partir de uma geometria do tipo *multipatch*, gerada com base em 108 polígonos de largura aproximada de 2 m na base da arriba demarcados sobre a nuvem de pontos, foram registadas as cotas da base da arriba. Por uma função espacial de proximidade (*estar contido em*), a cada conjunto de pontos contido em cada “sólido” (*multipatch*) foi atribuída a cota mínima do conjunto.



Figura 143 – Classificação da nuvem de pontos 3D em função da cota da base da arriba, em faixas de 2 m na base.

Os dados de entrada para modelação da suscetibilidade foram classificados de acordo com a Tabela 22. Para a Tabela 15 verificam-se as seguintes alterações: entrada dos fatores de predisposição referentes à resistência dos materiais e exposição, alteração nos valores de declive e conseqüente classificação, e cota da base da arriba.

Tabela 22 – Classificação dos fatores de predisposição e correspondente percentagem na nuvem.

Fatores	Classes	Número de pontos
Litologia	1 - Arenitos	56287
	2 – Basalto	10969

6. Suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas

	3 - Margas	201745
	4 - Calcários margosos	137980
Falhas	Presença (vs. Ausência)	Presença: 2267
Escorrência de água	Presença (vs. Ausência)	Presença: 4442
Proteção de sopé	1 – Blocos	289228
	2 – Plataforma abrasão	117753
Cotas	1 - [0 – 7.33[	67853
	2 - [7.33 – 10.21[	67892
	3 - [10.21 – 13.13[	67816
	4 - [13.13– 16.52 [	67843
	5 - [16.52 – 20.55[	67865
	6 - [20.55 – 29[	67711
Declive	1 - [0 – 65[	55925
	2 - [65 – 80[	47484
	3 - [80 – 90[	47945
	4 - [90 - 100[	56122
	5- [100 - 115[	87123
	6- [115 - 180[	112382
Rugosidade	1 - [0 – 0.008[	44705
	2 - [0.008 – 0.021[	55573
	3 - [0.021 – 0.031[	81543
	4 - [0.031– 0.047[	63677
	5 - [0.047– 0.063[	46405
	6 - [0.063– 0.094[	53327
	7 - [0.094 – 0.367[	32883
Exposição (Aspect)	1 - [-90 – -10[	33336
	2- [-10 – 10[	34096
	3 - [10 – 35[	74272
	4 – [35 – 50[	68897
	5 - [50 – 60 [	54466
	6 – [60 – 75[	77577

	7 - [75 - 90[	64337
Resistência dos materiais	1 - [-2.16 - -0.45[	48122
	2 - [-0.45 - 0.3[	44142
	3 - [-0.3 - -0.17[	62754
	4 - [-0.17 - 0[	115475
	5 - [0 - 0.15[	80339
	6 - [0.15 - 0.5[	4808
	7 - [0.5 - 1[	3892
	8 - [1 - 2[	1175
Cota base da arriba	1 - [min - 2.5[	3630
	2 - [2.5 - 3[	24348
	3 - [3 - 3.5[	32770
	4 - [3.5 - 4[	99304
	5 - [4 - 4.5[	96169
	6 - [4.5 - 5[	58840
	7 - [5 - 5.5[	47502
	8 - [5.5 - 6[	33818
	9 - [6 - max[	5593

A análise dos testes de R^2 de Cox & Snell e de Nagelkerk, bem como do teste de Hosmer e Lemeshow, indica, mais uma vez, que o modelo não se ajusta corretamente aos dados, com uma significância calculada inferior a $\alpha=0.05$, ainda que se verifique um ligeiro aumento relativamente ao Caso 1.

Verifica-se na tabela de classificação geral (Tabela 23) do modelo que este melhora ligeiramente na previsão das ocorrências. Também os valores de VP aumentam, indicando que a previsão de unidades afetadas por movimentos melhorou relativamente ao Caso 1.

Tabela 23 – Tabela de classificação geral do modelo.

Tabela de Classificação^a

	Observado	Previsto		
		Movs		Percentagem correta
		0	1	
Etapa 1	Movs 0	355075	1120	99,7
	Movs 1	48538	1954	3,9
	Percentagem global			87,8

a. O valor de recorte é 0.500

Finalmente, a AAC da curva ROC (Tabela 24, Figura 144) aumenta para 73.7%, indicando que se trata de um modelo com poder discriminatório razoável.

Tabela 24 – Área abaixo da curva ROC.

Área	Erro Padrão ^a	Sig. assintótico ^b	Intervalo de Confiança 95% Assintótico	
			Limite inferior	Limite superior
0,737	0,001	0,000	0,734	0,739

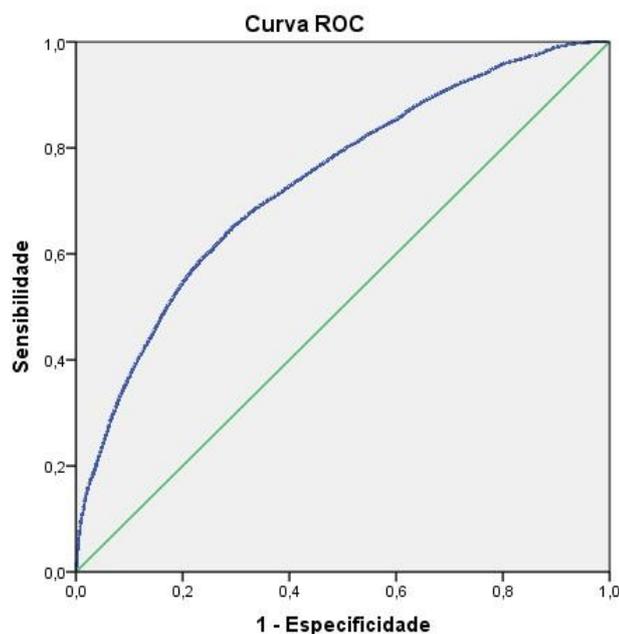


Figura 144 - Curva ROC do modelo produzido com a correspondente área abaixo da curva (a verde, a reta para o modelo aleatório).

A entrada de novos fatores e o melhoramento de fatores que já eram considerados no modelo, melhorou substancialmente os resultados da aplicação do modelo estatístico, havendo maior confiança nas probabilidades de ocorrência de movimentos de vertente calculadas.

A probabilidade prevista para a ocorrência de movimentos é então representada espacialmente e classificada por quantis, em que os valores mínimos e máximos determinados são 0 e 0.71. O mapa que se apresenta na Figura 146 (pág. 170) e Figura 147 (pág. 171) tem como objetivo demonstrar a capacidade, facilidade e utilidade da aplicação do modelo estatístico da regressão logística para o cálculo da suscetibilidade à ocorrência de movimentos.

A cartografia de suscetibilidade apresentada deverá ser interpretada à luz dos resultados obtidos com a aplicação do modelo de regressão logística aos dados.

O modelo de ajuste determinado pela regressão logística verificou-se ser de qualidade razoável relativamente à sua capacidade preditiva, tendo apresentado um valor de 0.737 de AAC (ROC). Usando outros métodos de

análise de regressão logística, como o *forward*, que adiciona sucessivamente, em cada etapa, uma nova variável independente e analisa como ela contribui para o ajuste do modelo, não há alterações nos resultados, e não se destaca ou despreza nenhuma variável como contribuindo para a maior capacidade do modelo.

Foi realizada uma análise a cada fator, aplicando a regressão logística de forma individual (Tabela 25).

Ordenando-os de forma crescente relativamente à área abaixo da curva ROC, foi feito o mesmo exercício, adicionando sucessivamente cada fator e calculando a AAC (Tabela 26).

Tabela 25 – AAC calculada para cada fator de predisposição individualmente.

Fator de predisposição	Abreviatura	AAC individual
Cota da base	Zbase	0.6212
Litologia	Lit	0.5891
Declive	Dec	0.5793
Cotas	Z	0.5786
Resistência dos materiais	ResisMat	0.5577
Exposição	Exp	0.5224
Rugosidade	Rug	0.5113
Falhas	Fls	0.5046
Escorrência Água	EscAg	0.5033

Tabela 26 – Contribuição de cada fator para o aumento da qualidade do modelo

Fator de predisposição	AAC	Contributo para o aumento da AAC
Zbase	0.62121	
Zbase+Lit	0.65635	0.03514
Zbase+Lit+Dec	0.67782	0.02147
Zbase+Lit+Dec+Z	0.72710	0.04928
Zbase+Lit+Dec+Z+ ResisMat	0.73176	0.00467
Zbase+Lit+Dec+Z+ ResisMat +Exp	0.73235	0.00059
Zbase+Lit+Dec+Z+ ResisMat +Exp+Rug	0.73268	0.00033
Zbase+Lit+Dec+Z+ ResisMat +Exp+Rug+Fls	0.73309	0.00040
Zbase+Lit+Dec+Z+ ResisMat +Exp+Rug+Fls+EscAgua	0.73309	0.00000

Este exercício permitiu verificar que a cota da base é o fator que mais contribui para a capacidade do modelo, seguido dos fatores litologia, declive, cota e medida da resistência relativa dos materiais. Os restantes fatores contribuem em muito pouco para o melhor desempenho do modelo, praticamente não alterando a sua qualidade.

O facto da cota da base da arriba ser aquele que mais contribui para a capacidade do modelo pode ser explicado pela ação da agitação marítima que ocorre sempre em períodos de preia-mar e pela ação mais intensa causada em períodos de temporal, e ainda, como consequência desta ação cíclica, os períodos de secagem/molhagem a que as cotas médias da face da arriba estão sujeitas.

Para trabalhos futuros que continuem o estudo da aplicação de modelos estatísticos para determinação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente a esta escala, deverão ter-se em consideração as seguintes questões:

- Todas as variáveis que reportam à morfologia da face da arriba (declive e exposição) alteram-se sempre que ocorre um movimento. Ao aplicar o modelo estatístico para determinação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos, dever-se-ia associar movimentos ocorridos à morfologia existente antes dessas ocorrências (que as terão eventualmente provocado). No caso presente, não foi possível recuperar a morfologia antiga, tendo sido utilizados os dados de declive e exposição referentes a 2014, o que poderá, em parte, justificar o desempenho do modelo aplicado por último;
- A variação litológica representada é baixa, apresentando apenas alternâncias entre margas e calcários margosos interrompidos, a meia altura, por uma camada mais resistente de arenitos, que se repetem novamente no topo da arriba. A alternância das margas e calcários margosos tem uma frequência muito alta, havendo camadas de margas, pouco resistentes e por isso de recuo mais rápido, com espessura de cerca de 0.2 m (Marques, 2006b), não possível de discriminar na base topográfica utilizada, já por si de elevada resolução espacial;
- A qualidade do inventário de movimentos é fundamental para um bom ajuste do modelo estatístico: o intervalo temporal de 15 anos analisado retribuiu, neste exercício, 90 movimentos ao longo de toda a arriba. No entanto, a delimitação destes movimentos, à escala de trabalho deste caso, deveria ter em consideração a separação da área de geração do movimento – superfície de rotura - da área de propagação.
- Por fim, a face da arriba desenvolve-se ao longo de cerca de 200m apenas e, na vertical, até aos 30m, podendo-se considerar esta uma escala muito local. A maioria dos fatores contemplados neste exercício, com a exceção da rugosidade da face da arriba e resistência relativa dos materiais por distância a uma superfície filtrada das altas frequências da arriba, são os utilizados na bibliografia para determinação da suscetibilidade à escala regional, pelo que poderá haver fatores não contemplados nesta análise que podem contribuir para a melhoria do desempenho do modelo (fatores de base física analisados a partir de um zonamento do maciço de acordo com a resistência dos materiais, estudo de fraturação, fendas de tração, etc.).

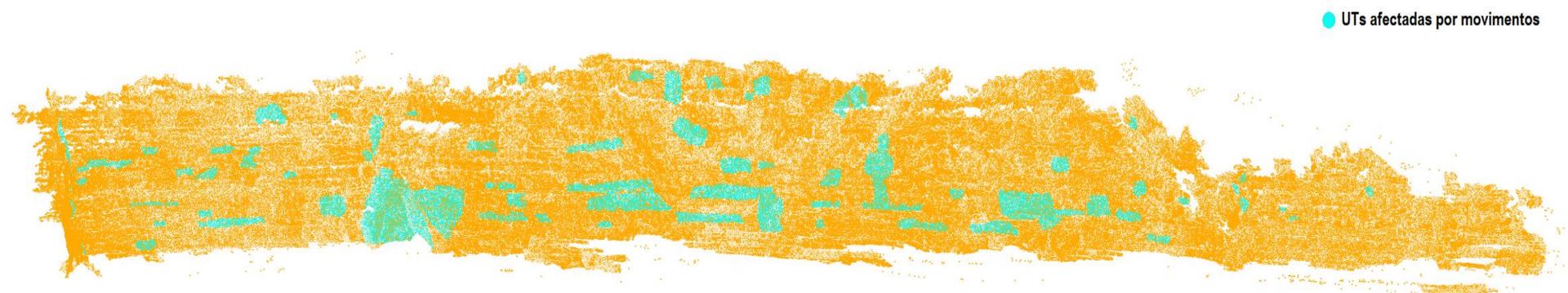


Figura 145 - Nuvem de pontos de referência de 2014 com os pontos afetados por movimentos datados de 1999 a 2014 selecionados: 50492 pontos de um total de 406981.



Figura 146 – Classificação dos pontos 3D da nuvem de referência pela probabilidade de ocorrência de movimentos calculada pelo modelo estatístico 1 (AAC = 0.69).

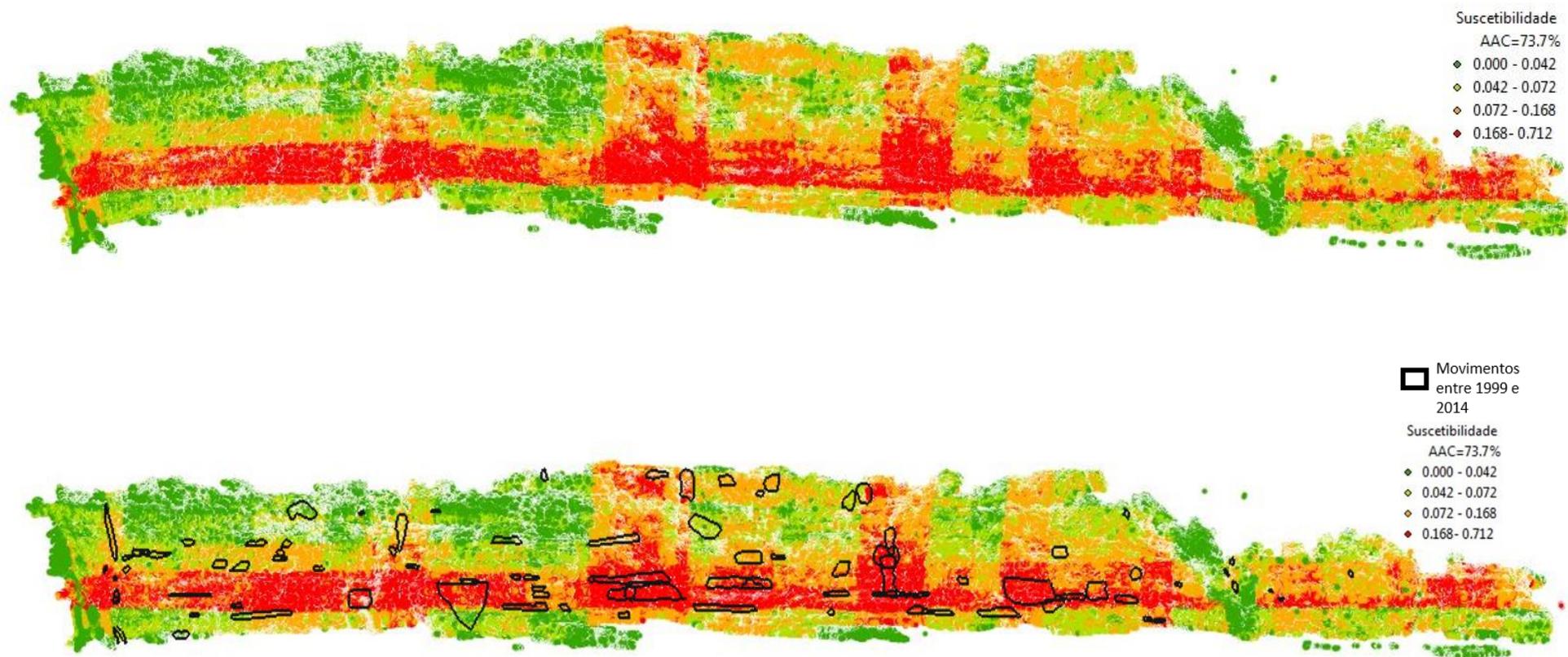


Figura 147 – Em cima: classificação dos pontos 3D da nuvem de referência pela probabilidade de ocorrência de movimentos calculada pelo modelo estatístico 2 (AAC = 0.737); Em baixo: movimentos registados entre 1999 e 2014 sobrepostos à classificação por probabilidade de ocorrência de movimentos calculada pelo mesmo modelo estatístico 2.

7. Considerações finais

A aplicação das técnicas apresentadas neste trabalho permite atingir os principais objetivos da monitorização de arribas litorais, como a observação e medição continuadas do fenómeno de movimentos de vertente, através da deteção e contabilização de alterações por registos periódicos da situação e disponibilização de resultados para interpretação. É necessária, portanto, a definição de uma época de observação de referência.

À escala regional, a situação de referência pode ser definida de forma rigorosa por fotogrametria aérea. Através desta técnica é possível compilar um inventário rico e preciso de movimentos de massa ocorridos em arribas, sobretudo na crista, baseado nos registos fotográficos que existem em Portugal, que datam desde os anos 30 do séc. XX. Estando a situação de referência definida, futuros voos fotográficos realizados podem ser processados e o inventário pode ser atualizado em conformidade.

À escala local, e em locais considerados prioritários para as autoridades com jurisdição no litoral, a situação de referência é definida pela primeira campanha terrestre a ter lugar- Época 0. Ambas as técnicas terrestres abordadas neste trabalho – fotogrametria e *laser scanning* – provaram a sua utilidade nesta tarefa, produzindo resultados muito relevantes mesmo perante a complexidade do objeto de estudo e da morfologia local.

Embora complementares, as técnicas aplicadas à monitorização de arribas apresentam vantagens e desvantagens. A fotointerpretação simples exige um investimento relativamente baixo e que se reporta, quando necessário, à aquisição de imagens. É uma técnica simples e uma fonte importante de informação qualitativa, mas os resultados que se obtêm não possuem precisão geométrica pelo que não possibilitam a análise quantitativa rigorosa de alterações entre diferentes épocas.

A fotogrametria aérea permite recolher valiosa informação geométrica e de contexto, em regiões vastas. Nenhuma outra técnica – LiDAR aéreo ou terrestre, pela sua recente aplicação, ou fotogrametria terrestre pelo seu alcance de aplicação curto – permite recuperar informações fiáveis sobre o terreno à escala regional, no passado.

O investimento necessário para o processamento fotogramétrico decresceu significativamente nos últimos anos com a possibilidade de realizar georreferenciação direta das imagens, com dados de GPS/IMU. No entanto, os levantamentos fotogramétricos mais antigos necessitam do tradicional processamento de georreferenciação por aerotriangulação e coordenação de pontos fotogramétricos no terreno.

Para a tarefa de monitorização de alterações na crista da arriba, as técnicas baseadas em geometrias de aquisição verticais são muito úteis mas, devido ao elevado declive das arribas rochosas litorais e tendo em consideração que muitos dos movimentos de massa que ocorrem em arribas têm lugar nas fachadas, não atingindo a crista, as técnicas terrestres apresentam-se como as mais adequadas para a monitorização destas zonas. As técnicas terrestres permitem a aquisição de dados de uma posição próxima da face da arriba e de uma perspetiva quase normal tornando-as as técnicas mais adequadas a aplicar nestes casos, ainda que apenas à escala local.

Embora a fotogrametria e o *laser scanner* terrestre sejam técnicas totalmente distintas, os resultados intermédios que se obtêm são tão equivalentes que o processo de comparação entre os métodos se torna difícil. A comparação só pode ser feita ao nível da operacionalidade. Ambas as técnicas requerem formação, *software* e recursos equivalentes. Geralmente, os levantamentos com *laser scanner* requerem menos estações de obtenção de dados que a fotogrametria terrestre mas, ao considerar a experiência realizada na praia da Bafureira, em que ambas as técnicas foram aplicadas simultaneamente, verificou-se que os levantamentos duraram aproximadamente o mesmo intervalo de tempo. A determinação de pontos fotogramétricos pode ser realizada apenas numa campanha de fotogrametria terrestre e estes serem utilizados em campanhas subsequentes, caso não tenham sido afetados por ocorrência de alterações na arriba, enquanto que, em cada campanha de *laser scanning*, a georreferenciação de alvos artificiais ou georreferenciação direta do equipamento no terreno é sempre obrigatória.

O maior custo associado à aquisição de um *laser scanner*, comparativamente a uma câmara digital de elevada qualidade, é compensado pela possibilidade de executar levantamentos em zonas onde o acesso à base da arriba é difícil ou mesmo impossível. No caso da fotogrametria terrestre, é necessário que haja acesso à base da arriba de forma a obter imagens da mesma. No entanto, a fotogrametria terrestre torna-se um método muito mais eficiente pela sua aplicação rápida, em casos de ocorrências que tenham de ser registadas de imediato. O *laser scanner* não consegue operar de forma correta em ambientes de elevada humidade ou pluviosidade e o laser não permite registar superfícies molhadas, limitações que não se colocam na aplicação da fotogrametria terrestre.

As nuvens de pontos são o resultado geométrico mais próximo da realidade que descreve a face de uma arriba. Produtos derivados como superfícies interpoladas ou suavizadas, apesar de, ao contrário das nuvens de pontos, serem interpretáveis num conjunto variado de *software*, constituem generalizações do objeto, o que constitui uma desvantagem, especialmente quando se pretende comparar pequenas alterações. O desenvolvimento de *software* que trabalha com nuvens de pontos originais e as compara entre si veio aumentar a precisão associada à monitorização de fachadas de arribas sem sair da geometria tridimensional das nuvens de pontos 3D que, associada à informação radiométrica real, se torna extremamente útil para a avaliação qualitativa e quantitativa desta morfologia pelos técnicos competentes.

Relativamente ao trabalho prático desenvolvido ao longo deste trabalho podem ser tecidas algumas considerações finais que se apresentam de seguida:

- [1] A realização simultânea de levantamentos por *laser scanner* terrestre e por fotogrametria terrestre permitiu verificar as diferenças entre os resultados de ambas as técnicas. As nuvens de pontos obtidas com uma e outra técnica são próximas, do ponto de vista do posicionamento. As diferenças absolutas que se observam, e que se concentram nos 0.3 m podem ser atribuídas às imprecisões associadas aos processos envolvidos em cada método: precisão dos equipamentos, registo de nuvens, correlação automática de imagens e ainda a aplicação do algoritmo de comparação de nuvens de pontos. Verifica-se maior proximidade entre as nuvens nos locais onde o varrimento por *laser scanner* se aproxima da perpendicularidade e a distâncias mais curtas relativamente à face da arriba, pelo que se conclui que o número de estações de varrimento deve garantir não só a cobertura total (ausência de lacunas e zonas de sombra) como a menor obliquidade dos raios *laser* e menor distância relativamente ao objeto de interesse;
- [2] As características geométricas da câmara, nomeadamente a distância focal fixa, acompanhadas de verificação do tempo de exposição e ausência de focagem automática, permitiram sempre uma

calibração com resultados de elevada precisão. Este facto reflete-se na qualidade posicional dos projetos fotogramétricos que se executaram nas diferentes épocas de observação. No entanto, é necessário algum cuidado no que respeita as bases fotográficas com que se obtém as imagens. Conclui-se ter que existir um compromisso entre a dimensão das bases fotográficas e a precisão que se pretende atingir na determinação das coordenadas 3D dos pontos objeto: utilização de imagens obtidas com uma sobreposição muito elevada, isto é, bases pequenas, dificulta o processo de orientação, como se pode verificar na menor precisão do levantamento em que mais imagens foram processadas (Época 2- FT2) uma vez que o ângulo de intersecção dos raios luminosos para cada ponto é pequeno e a determinação da sua posição 3D é mais imprecisa; no entanto, uma grande sobreposição entre imagens permite obter uma nuvem de pontos muito mais densa porque a correlação entre imagens mais semelhantes origina um número de pontos homólogos mais elevado. Bases maiores permitem a determinação mais precisa da posição 3D de cada ponto, mas a nuvem de pontos será menos densa devido à menor semelhança entre imagens;

- [3] No caso da determinação das alterações ocorridas nas arribas da praia da Bafureira, verificou-se, no intervalo de dois anos, por *laser scanning* (TLS0 a TLS2), um total de material perdido de cerca de $286.37 \pm 28.6 \text{ m}^3$, e por fotogrametria terrestre um total de $188.01 \pm 18.8 \text{ m}^3$ a que correspondem as épocas de observação FT0-FT1 e FT1-FT2, lembrando que TLS0 foi simultânea a FT0 e TLS2 a FT2. Esta diferença deve-se, em grande parte, ao volume perdido neste intervalo de tempo pela queda de um bloco de grandes dimensões no sector 3 que se reflete de diferentes formas consoante a técnica aplicada:

- No caso do varrimento com *laser scanner*, a queda do bloco no sopé da arriba é detetada entre as observações TLS0 e TLS2, uma vez que “bloqueia”, do ponto de vista do *laser scanner*, a face da arriba: o volume de material perdido entre os levantamentos pode estar sobrestimado pois o bloco não se depositou exatamente junto ao sopé mas sofreu algum rolamento, afastando-se da arriba, e o que se determina na diferença entre nuvens é a distância do bloco à face da arriba;

- No caso da fotogrametria terrestre, pela dimensão do bloco, ele constituiu um bloqueio de visão da face da arriba e, com base no levantamento fotogramétrico sequencial, ele não pode ser modelado por aparentar grande paralaxe. Assim, apenas a face da arriba que sofreu alterações e que está visível a partir do areal entrou na contabilização dos volumes perdidos, visto que a zona ocluída pelo bloco não é modelada. No entanto, através de fotogrametria terrestre, o bloco em si poderia ser modelado e o seu volume poderia ser calculado individualmente, ultrapassando esta dificuldade tal como demonstrado no Capítulo 5.3. Esta possibilidade é muito pouco viável com o *laser scanner* utilizado.

Portanto, por fotogrametria terrestre foi possível detetar uma alteração de valor elevado no local da queda do bloco mas como a nuvem após a queda estava incompleta nesse local, o volume perdido não pode ser totalmente calculado. O *laser scanner* conseguiu detetar a presença de um bloco onde antes não existia mas a alteração é dimensionada não pelo tamanho do bloco mas por este estar no ângulo de visão do equipamento, independentemente de estar acumulado junto ao sopé ou ter alcançado uma distância maior à arriba. Pode-se estar a medir a diferença entre a posição do bloco e a face da arriba;

[4] A monitorização anual das arribas da praia da Bafureira permitiu verificar as alterações ocorridas entre cada época de observação e a divisão em sectores permitiu ainda verificar que é o sector 3 aquele que mais alteração apresenta em cada intervalo de tempo: 14.61 m³, 108.24 m³ e 141.31 m³. As épocas de observação sequenciais permitiram ainda verificar que, pontualmente nos outros sectores, ocorrem alterações de maior magnitude (Tabela 27). É de sublinhar, no entanto, que entre as épocas FT2 e FT3, cujo intervalo de tempo é de 6 meses, todos os sectores sofreram alterações mais significativas que nos intervalos temporais das épocas anteriores, de 12 meses. Acrescenta-se ainda que o intervalo de tempo entre FT2 e FT3 corresponde ao período de Abril a Outubro, época seca.

[5]

Tabela 27 – Resumo dos volumes perdidos, por sector e por épocas de observação, na praia da Bafureira.

Intervalo de observação	Sector	Volume perdido (m ³)
TLS0 - TLS2 (27/03/2012 a 07/04/2014)		286.37 ± 28.6
FT0 - FT1 (27/03/2012 a 02/04/2013)	1	3.0237 ± 0.3
	2	1.27 ± 0.1
	3	14.61 ± 1.4
FT1 - FT2 (02/04/2013 a 07/04/2014)	1	28.28 ± 2.8
	2	5.41 ± 0.5
	3	108.24 ± 10.8
FT2 - FT3 (07/04/2014 a 23/10/2014)	1	2.86 ± 0.3
	2	17.75 ± 1.7
	3	141.31 ± 14.1

Perante estes resultados, é recomendável a continuação dos levantamentos com periodicidade anual, caso nenhum alerta seja emitido, por fotogrametria terrestre ou *laser scanner*. Nos casos de ocorrência de movimentos entre épocas de observação, a realização de um levantamento fotogramétrico revela-se mais eficiente que um varrimento por *laser scanner*. A facilidade de transporte do equipamento bem como a possibilidade de realizar várias posições de obtenção de imagens torna-se mais flexível que a utilização do *laser scanner* que obriga a maior logística, nova georreferenciação e tempo e pessoal envolvidos;

[6] Em termos de operabilidade, concluiu-se que o levantamento por *laser scanner* é relativamente simples, ainda que moroso, em resultado dos requisitos de funcionamento do equipamento e da monitorização. Relativamente à utilização prática do equipamento pôde constatar-se, reportando ao caso da praia do Porto da Calada, que:

- O equipamento utilizado é pesado e de difícil transporte e deslocação na área de interesse;
- Sem alternativa de boa qualidade, a segunda estação (P5) foi realizada num passadiço de madeira para ligação do areal ao apoio de praia havendo vibração durante o funcionamento do *laser scanner*;
- A necessidade de apoio para o computador portátil, alternativas de carregamento da bateria do mesmo, necessidade de proteção do equipamento contra sobreaquecimento, causado pela ação direta do sol tal como a dificuldade de visualização do monitor devido à luminosidade tornam o processo pouco prático;

A região do talude da estrada colocou dificuldades relevantes na execução de ambas as técnicas devido à presença desvantajosa da rede metálica de contenção de blocos e detritos. Do ponto de vista do *laser scanner*, foi necessário aumentar a resolução nominal de registo de pontos no varrimento desta zona, de forma a tentar maximizar a probabilidade de registo de pontos na superfície do talude e não pontos registados por sinal

refletido na rede. Relativamente ao processamento fotogramétrico, a presença da rede revelou-se um obstáculo total à correlação automática de imagem sendo esta impossível de executar devido aos diferentes aspetos que a rede apresenta de imagem para imagem (Figura 148). A existência deste objeto sobreposto à superfície do talude, bem como os reflexos com a variação do ponto de vista relativamente à rede, impedem a geração de uma nuvem de pontos.



Figura 148 – Reflexos da rede metálica sobreposta à superfície do talude impedem a geração da nuvem de pontos por correlação automática de imagem.

[7] Ainda que a nuvem resultante de um levantamento com *laser scanner* terrestre com imagem incorporada seja mais informativo e possibilite a execução de produtos adicionais, como ortofotos, por exemplo, a resolução da imagem não permite uma análise detalhada do objeto a monitorizar. No caso do equipamento utilizado, a câmara encontra-se incorporada no sistema de espelhos, mas noutros equipamentos é possível acoplar uma câmara externa de melhor qualidade, normalmente uma DSLR, com um *offset* conhecido, previamente calibrada e orientada relativamente ao sistema de coordenadas interno do *scanner*. Em ambos os casos, a qualidade de imagem obtida num varrimento *laser* dificilmente superará a qualidade de imagem conseguida num levantamento fotogramétrico. Ainda que usando a mesma câmara, entre outros problemas, a posição do *laser scanner* relativamente ao objeto será sempre aquela que maior área consegue cobrir num único levantamento e, claramente, mais distante que as imagens obtidas para fins fotogramétricos.

É um exemplo desta situação o talude da estrada: é evidente a diferença entre as imagens obtidas pela câmara do *laser scanner* e cor atribuída a cada ponto 3D (Figura 149, em cima), as imagens obtidas para processamento fotogramétrico (Figura 149, em baixo) e ainda o pormenor das nuvens de pontos finais (Figura 150). Verifica-se que as nuvens obtidas por fotogrametria são mais densas que as obtidas por varrimentos com *laser scanner*. Isto deve-se à elevada qualidade geométrica e radiométrica das imagens e assim se conseguir determinar pontos 3D para praticamente todos os pixels da imagem;

[8] Tomando como exemplo os levantamentos na praia da Bafureira: FT0, com 36 imagens, e FT1, com 114 imagens - o número de pontos da nuvem total FT1 praticamente quadruplica e a ocupação de espaço em disco duplica. Esta situação deve-se ao facto de mais imagens com pequenas bases permitirem gerar nuvens de pontos com muito elevada resolução geométrica média, tendo-se conseguido chegar aos 0.02 m, por vezes com possibilidade de aumentar essa resolução. No entanto,

esta enorme densidade de pontos não é gerível com os meios computacionais disponíveis: todas as nuvens que foram alvo de comparação utilizando os algoritmos de deteção de alterações entre nuvens de pontos tiveram de ser decimadas para resolução de 0.05 ou 0.07 m. Esta diminuição da resolução permitiu manobrar melhor as nuvens em ambiente 3D, em diferentes *software*, e diminuiu o tempo de cálculo de diferenças.

Verifica-se, então, que o consumo de tempo e o quase total domínio das capacidades computacionais disponíveis na fase de geração de nuvens de pontos não compensa e a resolução ideal, para este objetivo, não deverá ser superior a 0.05 m;

- [9] Na fase de determinação de alterações utilizando o algoritmo M3C2, deve ter-se especial atenção aos parâmetros de cálculo. As escalas locais D e d (ver Capítulo 4), a nuvem a partir da qual se definem os *core points* e o erro de registo/georreferenciação das nuvens envolvidas no processo, influenciam consideravelmente o resultado;
- [10] Também nesta fase de processamento, em que é utilizado o *software* Matlab, se coloca a questão da dimensão (quantidade de pontos) das nuvens de pontos a trabalhar. Nuvens de grande dimensão não podem ser usadas nos cálculos de volumes, gerando obstáculos como saturação de memória, matrizes de dimensão não suportada pelo programa e erros em funções estatísticas do programa que não permitem dados desta dimensão. Verificou-se que, para se utilizar o programa VOLTERRE, cada nuvem não deverá ultrapassar os 500 mil pontos, tendo para isso que ter sido decimadas algumas nuvens para 0.1 m de resolução e/ou a partição em sectores;
- [11] Embora a metodologia desenvolvida por Stumpf *et al.* (2013) permitisse determinar o volume de uma alteração a partir da nuvem de diferenças, fazia-o recorrendo a um método de interpolação e não respondia a todas as necessidades de cálculo de parâmetros sobre os *clusters* que são necessários à caracterização dos movimentos a inventariar. Embora baseando-se na metodologia de Stumpf *et al.* (2013), a metodologia que foi desenvolvida e programada em Matlab – VOLTERRE – permitiu ultrapassar as desvantagens de uma interpolação de valores no cálculo dos volumes associados a cada alteração e, ainda, a determinação automática de área, largura e altura de cada alteração. Relativamente aos *clusters*, estes são aglomerados de pontos que resultam da aplicação de critérios como a distância 3D entre eles, número mínimo de pontos para se formar um *cluster* e na sua densidade. Estes critérios foram definidos dentro do contexto deste trabalho e com o objetivo de descreverem geometricamente uma massa de terreno movimentado entre duas épocas de observação;
- [12] A tarefa de verificação dos *clusters* automaticamente criados deve ser contextualizada aquando da inventariação de movimentos individuais, pois um movimento pode estar representado por dois ou mais *clusters*, especialmente quando se trata de grandes movimentos como o que se verificou na praia da Bafureira entre as Épocas FT2 e FT3 (intervalo 07/04/2014 a 23/10/2014): no sector 3, a aplicação do algoritmo de cálculo de volumes considerou a existência de 32 *clusters* para uma alteração correspondente a um único movimento de grandes dimensões. A determinação dos *clusters* é, como descrito, realizada sempre na nuvem de pontos tridimensional pelo que o número de *clusters* não igualar o número de movimentos é totalmente aceitável: em ambiente tridimensional, o processo determina conjuntos de pontos próximos que podem estar separados por pequenos intervalos de

distância 3D; do ponto de vista da interpretação geológica, o que deve ser interpretado como um só movimento, pode ser representado por vários *clusters* de pontos tridimensionais;

- [13] A definição automática de *clusters* verifica-se ser muito útil na definição do número de movimentos ocorridos entre épocas de observação, de forma quase automática, deixando de ser necessário um exaustivo trabalho de comparação fotográfica estereoscópica, ficando esta apenas reservada para a aferição dos *clusters* calculados.

Utilizando como exemplo o caso da praia do Porto da Calada, em que se estava em posse das alterações ocorridas no intervalo de um ano, verificou-se ser possível proceder à inventariação dos movimentos com base nos *clusters* definidos pelo programa VOLTERRE. Em todos os sectores monitorizados, foram analisadas as alterações ocorridas de forma a delimitar movimentos definidos por um ou mais *clusters*. Acompanhada de uma interpretação de imagem para a caracterização da litologia afetada em cada movimento e definição da tipologia do movimento, cada movimento inventariado foi ainda caracterizado com os fatores calculados automaticamente pelo programa VOLTERRE: volume mobilizado, área, largura e altura. Para a tarefa fundamental de interpretação de imagem, aconselha-se a utilização de imagens originais do levantamento fotogramétrico ou das nuvens de pontos geradas por fotogrametria porque têm radiometria associada e de melhor qualidade.

Tendo em conta a importância de um inventário de movimentos completo e bem caracterizado, com pouca subjetividade associada pois todas as características morfométricas dos movimentos são calculadas automaticamente usando funções matemáticas, verifica-se que o programa desenvolvido – VOLTERRE – é de enorme utilidade. Considera-se que o programa trouxe um avanço significativo na inventariação de alterações e na tarefa de caracterização dos movimentos para a construção de um inventário robusto da face da arriba.

No caso particular da praia do Porto da Calada, após despiste de alterações não referentes a movimentos de massa, foram delimitados e caracterizados 53 movimentos ocorridos entre as duas épocas de observação realizadas: Junho de 2012 e Julho de 2013;

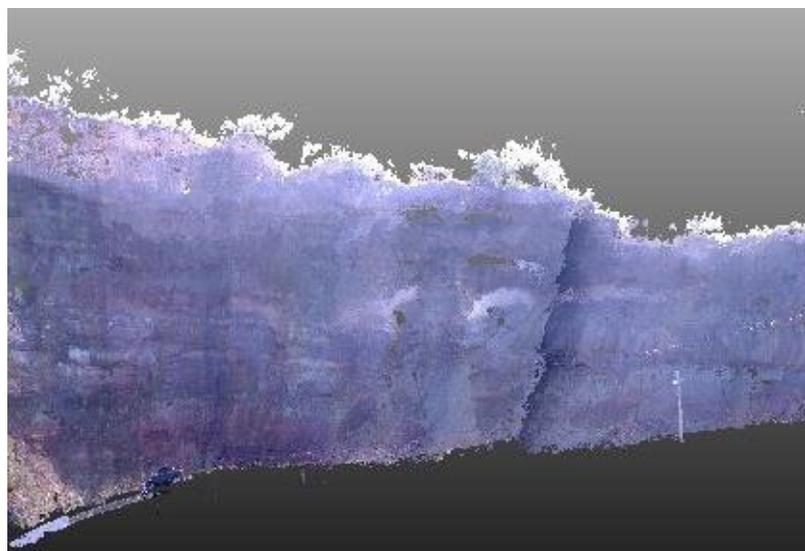


Figura 149 – Diferença na qualidade das imagens utilizadas para texturização da nuvem de laser scanner e imagem obtida de perto da posição do laser scanner com uma Nikon D80.

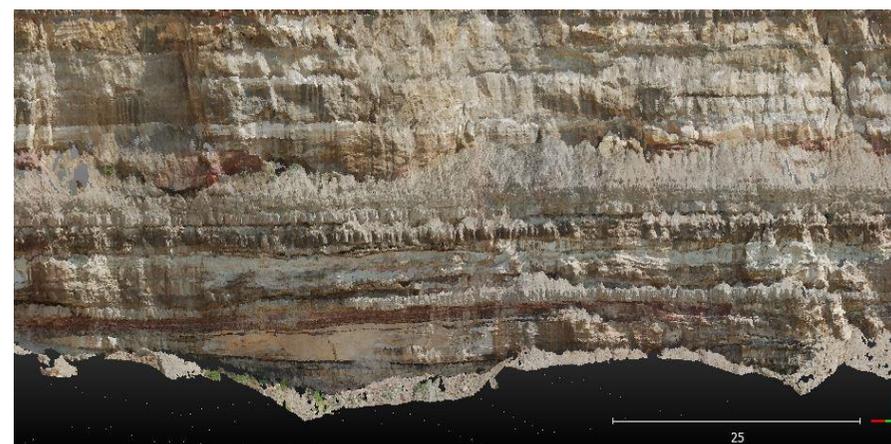
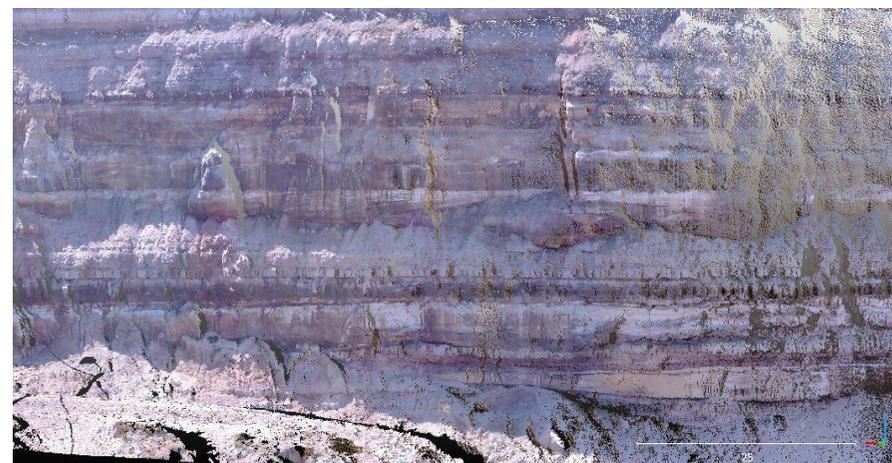


Figura 150 – Diferença na qualidade de imagem nas nuvens de pontos texturizadas com imagens obtidas por câmara fotográfica incorporada no laser scanner (em cima) e nuvem de pontos calculada por correlação automática de imagem e texturizada com as imagens do levantamento fotogramétrico (em baixo).

- [14] Ainda associada à temática da inventariação de movimentos, mais uma vez a fotogrametria terrestre possibilitou a modelação de blocos rochosos de grandes dimensões de uma forma simplificada. Com uma cobertura fotogramétrica densa do bloco, a que se pode associar uma referência métrica absoluta (metro articulado visível em várias imagens, por exemplo, ou medindo alguns segmentos conspícuos no próprio bloco), é possível, de forma rápida, modelar o bloco em 3D por geração de uma nuvem de pontos 3D densa, e calcular o seu volume através da aplicação de uma α -shape (ver Capítulo 4) à nuvem de pontos 3D. Ainda na mesma temática, a exploração da informação de imagens hiperespectrais georreferenciadas poderá aumentar o grau de automatismo do processo de inventariação, classificando a litologia da face da arriba pelas suas assinaturas espectrais;
- [15] Os dados que puderam ser recolhidos através das técnicas aplicadas neste trabalho e ainda o processamento de dados que os algoritmos desenvolvidos permitiram realizar, possibilitou a estimação de taxas de recuo anuais médias, informação fundamental para estudos de pormenor e planeamento do litoral. Salienta-se que curtos períodos de tempo de monitorização influenciam muito as estimativas das taxas de recuo, tendendo estas a não se aproximarem das estimativas a longo prazo devido à heterogeneidade do processo, tanto a nível temporal, como da localização e dimensão dos movimentos (Marques, 1997). No entanto, verificou-se que, para os setores Bafureira e Porto da Calada, as ordens de grandeza das taxas calculadas com os dados deste trabalho correspondem às ordens de grandeza apresentadas por Sunamura (1992) e, posteriormente resumidas por Marques (1997), para as litologias que ocorrem nos locais de estudo:
- Calcários: 10^{-3} a 10^{-2} m/ano;
 - Flish, xistos argilosos, argilitos: 10^{-2} m/ano;
 - Arenitos e rochas sedimentares terciárias: 10^{-1} a 10^0 m/ano;
 - Depósitos quaternários: 10^0 a 10^1 m/ano;

Setor		Período de monitorização (anos)	Taxa recuo médio anual (m/ano)
Praia da Calada	Arriba Norte	1	3.73×10^{-2}
	Arriba Sul		2.15×10^{-2}
	Talude da estrada		6.29×10^{-2}
Bafureira	TLS	2	0.4×10^{-1}
	FT	2.5	0.4×10^{-1}

- [16] Foi testada uma metodologia para monitorização de arribas inacessíveis, baseada numa plataforma aérea, móvel, onde se acoplou uma GoPro Hero 3, uma câmara de vídeo comercial, com objetiva olho de peixe. Esta metodologia provou ser adequada para uma monitorização de precisão média e compatível com estudos de deteção e quantificação de alterações em 3D, com dimensões superiores a 0.5 m, cumprindo as metas de simples observação de setores costeiros em projetos de monitorização. A simulação do efeito do obturador de rolamento existente nesta câmara revelou que esta questão é uma significativa fonte de erro. A precisão geométrica poderá certamente melhorar com o uso de outros tipos de obturadores. Presentemente está a ser desenvolvida investigação fundamental sobre este efeito.

Os resultados também permitem uma simplificação significativa na tarefa de monitorização de segmentos longos de arriba. Considerando que são periodicamente realizados levantamentos fotogramétricos terrestres em algumas praias distribuídas ao longo dos segmentos, utilizando como referência as nuvens de pontos geradas (NPCs - nuvens de pontos de controlo), é possível georreferenciar vídeos de segmentos longos de arriba. Situações como arribas mergulhantes, acessibilidade difícil e situações de risco para pessoal e equipamento podem assim ser ultrapassadas, bem como a necessidade de recolher pontos de controlo especificamente para os vídeos GoPro. Este modo de georreferenciação de vídeo continua em investigação.

Estes vídeos são realizados frequentemente por empresas locais de voo em parapente que operam em arribas rochosas ao longo da costa oeste para fins recreativos. A procura por esta atividade é tão alta que poderia até mesmo ser considerada a implementação de uma plataforma *crowd sourcing* contendo vídeos datados de arribas. Autoridades locais e regionais com jurisdição na zona costeira poderiam beneficiar destas gravações frequentes para ajudar na tarefa de monitorização do litoral de arriba;

[17] O modelo de previsão de ocorrências determinado pela regressão logística verificou-se ser de qualidade razoável relativamente à sua capacidade preditiva, tendo apresentado um valor de 0.737 de AAC (ROC). Verificou-se que os fatores cota da base da arriba, litologia, declive, cota e resistência dos materiais são aqueles que melhor explicam o fenómeno de movimentos na face da arriba em Ribeira de Ilhas, uma vez que adicionando os restantes fatores que foram explorados, a qualidade do modelo já não é significativamente alterada.

A aplicação à escala local - em fachadas de arriba - da regressão logística para a determinação da probabilidade de ocorrência de movimentos demonstrou que são os fatores locais que melhor explicam o fenómeno pelo que, de futuro, deverão ser considerados fatores mais relevantes a uma escala tão grande, refinando a caracterização da face da arriba, especialmente fatores de natureza geológica: grau de fraturação do maciço rochoso, refinamento da variação litológica e separação entre zona de geração e de propagação do movimento;

[18] Utilizando uma plataforma de criação de mapas *online* gratuita (ArcGIS Online, ESRI), foi possível criar uma aplicação onde constam exemplos dos dados produzidos neste trabalho, em ambiente 3D. Esta aplicação permite que o utilizador visualize e inquirir os dados disponibilizados: nuvens de pontos representativas da topografia da face da arriba, cartografia da suscetibilidade à ocorrência de movimentos e *clusters* de movimentos localizados na nuvem de pontos 3D. Para além disso, o utilizador tem ainda acesso a informação de contexto como imagens de câmaras que registam, em tempo real, o ambiente da praia que está a visualizar. Do ponto de vista das instituições de administração central e local, esta pode ser uma ferramenta útil para verificar a situação das praias trabalhadas, à data de obtenção dos dados, e ter informação sobre o estado do mar e meteorologia, em tempo real, auxiliando na fase de planeamento de missões de campo;

[19] A gestão e partilha de dados tridimensionais em bases de dados tem sido um tópico pouco explorado na literatura muito devido ao *software* existente que não permite ou não está preparado para implementar modelos de dados que respeitem verdadeiramente o formato tridimensional dos dados, mantendo-se o tradicional formato 2D ou 2.5D para representação do terreno (Löwner, 2010). Embora já existam soluções para a representação tridimensional de estruturas artificiais, sobre e sub-superfície, como é o caso dos *software* de BIM e codificações como o CityGML, a mesma aproximação

para formas naturais torna-se particularmente complexa: formas geomorfológicas sofrem alterações devido a diferentes processos, ao longo do tempo. É necessário, pois, registrar o histórico das alterações (tempo) sofridas por uma forma geomorfológica (objeto/geometria) por atuação de um processo, com informação semântica associada. Até à presente data foram propostos modelos conceituais 4D que contêm a geometria, topologia e descrição semântica de objetos ou formas naturais baseados em linguagem UML e GML (Löwner, 2010a; Löwner, 2010b; Löwner e Becker, 2013; Löwner, 2013a; Löwner, 2013b) mas tais modelos não puderam ainda ser implementados em *software* GIS. No futuro, com o desenvolvimento de *software* que permita a modelação e a definição de topologia para geometrias 3D com informação semântica associada, poderá ser possível representar estas formas e realizar análise espacial sobre elas, seguindo *standards* de interoperabilidade.

Referências por Capítulo

1. Introdução

Andrade C., Marques F.M.S.F e Freitas M.C. (coordenadores) 2013. Relatório Final, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P., Lisboa, junho 2013, 47 pp. + anexos (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Água/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/Relatorio%20final_CISML.pdf)

ANPC (2010). Cadernos Técnicos PROCIV. Edição: Autoridade Nacional de Proteção Civil, Junho de 2010

Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). Landslide Types and Processes. In: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board. National Academy Press, Washington D.C.. Special Report 247, pp. 36-75.

Decreto-Lei n.º 166/2008, de 22 de Agosto (2008) Diário da República, 1.ª série — N.º 162 — 22 de Agosto de 2008. (Reserva Ecológica Nacional).

Guzzetti, F. (2005). Landslide hazard and risk assessment: concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslide susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. PhD thesis. Mathematischnaturwissenschaftliche Fakultät da Rheinischen Friedrich-Wilhelms, Bona University.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale, *Geomorphology*, 72, 272–299.

Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Sousa, H., Silveira, T., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P., Garzón, V., Bastos, A., Diogo, Z., Taborda, R., Andrade, C., Freitas, M.C. (2013a). Entregável 1.2.1.a Caracterização das principais unidades geológicas e da organização geomorfológica da faixa costeira. *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo*. FFCUL/APA, I.P., Lisboa, junho 2013, 36 p. (não publicado).

Marques, F., Matildes, R., Redweik, P., Penacho, N., Queiroz, S., Garzón, V., Rosa, M., Gonçalves, T. (2013b). Entregável 1.2.2.1.c Monitorização da evolução de fachadas de arribas selecionadas: técnicas e resultados. . *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo*. FFCUL/APA, I.P., Lisboa, junho 2013, 22 p. (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Água/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.2.2.1.c_Monitorizacao%20arribas.pdf)

Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P. (2013c). Entregável 1.3.3.a Estudo da adequabilidade das faixas de risco/salvaguarda definidas no POOC em vigor. *Relatório Técnico, Projeto*

Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P., Lisboa, junho 2013, 66 p. (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.3.3.a%20Faixas%20de%20risco.pdf)

Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P. (2013d). Entregável 1.4.1.1.a Definição de um quadro de referência a aplicar em projetos de intervenção nas arribas. *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P.*, Lisboa, junho 2013, 162 p. (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.4.1.1.a%20Quadro%20referencia%20arribas.pdf)

Penacho, N., Marques, F., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P., Garzón, V. (2013a). Entregável 1.2.2.1.a Inventário de instabilidades nas arribas obtido por fotointerpretação. *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P.*, Lisboa, junho 2013, 48 p. (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.2.2.1.a_Fotointerpretaao%20arribas.pdf)

Penacho, N., Marques, F., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P. (2013b). Entregável 1.3.1.a Determinação e cartografia da perigosidade associada à ocorrência de fenómenos de instabilidade em arribas à escala regional. *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P.*, Lisboa, junho 2013, 27 p. (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.3.1.a%20Suscetibilidade.pdf)

Redweik, P., Matildes, R., Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Garzón, V., Rosa, M., Gonçalves, T. (2013). Entregável 1.2.2.1.b Inventário de instabilidades obtido por fotogrametria aérea digital multitemporal em sectores de arribas selecionados. *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P.*, Lisboa, junho 2013, 19 pp.

(http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.2.2.1.b_Fotogrametria%20arribas.pdf)

Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley, New York, 302 pp.

Trenhaile, A. (1987). *Geomorphology of Rock Coasts*. Oxford, Oxford University Press.

Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L.; Krizek, R.J. (Eds.), *Landslides, Analysis and Control. Special Report*, 176. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., p.11-33.

Varnes, D.J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Volume 3, *Natural Hazards*. UNESCO, Paris, 63 pp.

2. Estado da Arte

Abellan, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring, *Geomorphology*, 119(3–4), 162–171, doi:10.1016/j.geomorph.2010.03.016, 2010.

ANPC (2010). *Cadernos Técnicos PROCIV*. Edição: Autoridade Nacional de Proteção Civil.

Baltsavias, E. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 54, Issues 2–3, July 1999, Pages 83–94

Barber, D., Mills, J., Bryan, P. (2001). Laser scanning and photogrammetry: 21st century metrology. *CIPA Symposium*.

Beraldin J.A. (2004). Integration of Laser Scanning and Close Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond. In: *Proceedings of the XXth International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress*, Istanbul, Turkey, July 12–23 (2004), pp. 972–983.

Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A. (2004). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies, in: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress Geo-Imagery Bridging Continents*, XXXV, part B5, Istanbul, Turkey, 12–23. July 2004, ISPRS, 246–251.

Buckley, S., Enge, H., Carlsson, C., Howell, J. (2009). Terrestrial Laser Scanning for use in Virtual Outcrop Geology. *Proceedings of RSPSoc 2009 Annual Conference*, 8-11th September 2009, Leicester, UK: 321-324.

Buckley, S.J., Howell, H.D., Enge, H.D., Kurz, T.H. (2008). Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, London, 165 (2008), 625–638.

Catalão, J., Catita, C., Miranda, J., Dias, J. (2002). Photogrammetric analysis of the coastal erosion in the Algarve (Portugal). *Géomorphologie: relief, processus, environment* – Numéro 2, 119-126.

Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull. Eng Geol Environ* 65: 341-411.

Chandler, J. H. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1): 51–63.

CloudCompare (version 2.6.2) [GPL software]. EDF R&D, Telecom ParisTech (2015) – <http://www.cloudcompare.org/>

Collins, B., Stock, G. (2012). Lidar-based rock-fall hazard characterization of cliffs. *Proceedings of the 2012 American Society of Civil Engineers GeoCongress*, p. 3021-3030

Demir, N., Bayram, B., Alkis, Z., Helvacı, C., Çetin, I., Vögtle, T., Ringle, K., Steinle, E. (2004). Laser scanning for terrestrial photogrammetry, alternative system or combined with traditional system? *XXth ISPRS Congress: Proceedings of Commission V*, Istanbul, Turkey, 193-197.

Dewez, T., Chamblas, G., Lasseur, E., Vandromme, R. (2009). Five seasons of chalk cliff face erosion monitored by terrestrial laser scanner: from quantitative description to rock fall probabilistic hazard assessment, *Geophysical Research Abstracts*, 11, 2009– 8218

Dewez, T. (2014). Reconstructing 3D coastal cliffs from airborne oblique photographs without ground control points. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5.

Falkingham, P. (2013). Generating a Photogrammetric model using VisualSFM, and post-processing with Meshlab.

(http://www.academia.edu/3649828/Generating_a_Photogrammetric_model_using_VisualSFM_and_post-processing_with_Meshlab.pdf) (Acesso: Junho 2014).

Fonstad, M., Dietrich, J., Courville, B., Jensen, J., Carbonneau, P. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landforms* 38, 421–430.

Fookes, P., Dale, S., Land, J. (1991). Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24, 249-265.

Girardeau-Montaut, D. Roux, M., Marc, R., Thibault G. (2005). Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, the Netherlands, September 12-14.

Girardeau-Montaut, D. (2006). *Detection de Changement sur des Données Géométriques 3D*, manuscrit de thèse, spécialité Traitement du Signal et Images, Telecom Paris.

Gulyaev, S. A. , Buckeridge, J. S. (2004). Terrestrial Methods for Monitoring Cliff Erosion in an Urban Environment. *Journal of Coastal Research*: Volume 20, Issue 3: pp. 871 – 878.

Guzzetti, F. (2005). *Landslide hazard and risk assessment*. PhD Thesis. University of Bonn.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale, *Geomorphology*, 72, 272–299.

Hapke, C.J. (2004). Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 679-697.

Hart, A., Griffiths, J., Mather, A. (2009). Some limitations in the interpretation of vertical stereo photographic images for a landslide investigation. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42, 21-30.

Hoffmeister, D., Tilly, N., Curdt, C., Aasen, H., Ntageretzis, K., Hadler, H., Willershäuser, T., Vött, A., Bareth, G. (2012). Terrestrial laser scanning for coastal geomorphologic research in western Greece. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B5, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia

Horikawa, K.; Sunamura, T. (1967). A study on erosion of coastal cliffs by using aerial photographs. *Coastal Engineering in Japan*, v. 10, pp. 67-83.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2010). Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* 61: 5-28.

James, M. R., Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, F03017, doi:10.1029/2011JF002289.

- Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A. Kager, H. (2004). Terrestrial laserscanning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another. *XXth ISPRS Congress: Proceedings of Commission V*, Istanbul, Turkey.
- Katz, O., Mushkin, A. (2012). Characteristics of sea-cliff erosion induced by a strong winter storm in the eastern Mediterranean. *Quaternary Research* 80 20–32.
- Kolecka, N. (2011). Photobased 3D scanning vs. laserscanning – competitive data acquisition methods for digital terrain modelling of steep mountain slopes. *ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. Proceedings of Volume XXXVIII-4/W19.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 (2013) 10–26.
- Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S., Wiechert, A. (2010). Point clouds: Lidar versus 3d vision. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(10), 1123–1134.
- Lim, M., Petley, D., Rosser, N., Allison, R., Long, A. (2005). Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. *The Photogrammetric Record*, 20 (110): 109-129.
- Lowe, D. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. Journal of Computer Vision* 60(2), pp. 91–110.
- Marques, F. e Romariz, C. (1991). Preliminary note on sea cliff retreat. 4 Cong. Nac. Geotechnics, 2–4 Oct, Lisbon. Proc., 1, Port. Soc. Geotechnique, Lisbon, 57–66.
- Marques, F.M.S.F. (1997a). As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos. Dissertação de Doutoramento. *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. 556 pp.
- Marques, F. M. S. F. (1997b). Evolução de arribas litorais: Importância de estudos quantitativos na previsão de riscos e ordenamento da faixa costeira. *Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação EUROCOAST-PORTUGAL, Porto, p. 67-86.
- Marques, FM.S.F. (1998). Sea cliff retreat in Portugal: overview of existing quantitative data. V Congr. Nacional Geologia, 18-20 Nov. 1998, Lisboa. *Comunicações do IGM* 84 (1): C 75-78.
- Marques, F.M.S.F. (2006). A simple method for the measurement of cliff retreat from aerial photographs. *Zeitschrift für Geomorphologie - Supplementbände*, 144, 39-59.
- Marques, F., Matildes, R., Redweik, P. (2011). Statistically based sea cliff instability hazard assessment of Burgau-Lagos coastal section (Algarve, Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 64: 927-931.
- Marques, F.M.S.F., Matildes, R., Redweik, P. (2013). Sea cliff instability susceptibility at regional scale: a statistically based assessment in the southern Algarve, Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 3185-3203 (doi: 10.5194/nhess-13-3185-2013) <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/3185/2013/nhess-13-3185-2013.pdf>
- Marques, R. (2013). Estudo de movimentos de vertente no Concelho da povoação (ilha de São Miguel, Açores): inventariação, caracterização e análise da susceptibilidade. Tese de Doutoramento. Universidade dos Açores.

Matildes, R., Redweik, P., Marques, F., Santos, L. (2008). Detecção e medição de recuos nas arribas no litoral do Algarve para integração em SIG. *X Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica* (Oeiras, Portugal), 759-771.

Matildes R., P. Redweik, F. Marques, N. Penacho, J. Rodrigues (2012). Aplicação de técnicas de detecção remota na monitorização de litoral de arriba rochosa – Caso de estudo da Praia do Porto da Calada, Portugal. *Actas do VII Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica*. Editores: M. C. Freitas, J. Cascalho, R. Taborda, M. Ribeiro, T. Drago, C. Andrade, F. Fatela, A. Cruces. 16 - 20 de Dezembro de 2012, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Matildes, R., Redweik, P., Marques, F. (2013a). Application of remote sensing techniques for monitoring coastal cliffs: comparison and examples. *24th Annual General Meeting of the Geological Remote Sensing Group* (Special interest group of The Geological Society and the Remote Sensing and Photogrammetry Society). 'Status and developments in geological remote sensing'. 9 – 11 Dezembro 2013, Berlim (*Book of Abstracts*)

Matildes, R., Redweik, P., Marques, F., Penacho, N. (2013b). Application of terrestrial photogrammetry and terrestrial *laser scanner* periodic surveys for monitoring coastal cliff evolution – Contribution to land management projects. *Book of Abstracts of the 12th International Coastal Symposium*, 260.

Matthews, M., Clayton, C. (1986). The use of oblique aerial photography to investigate the extent and sequence of landslipping at Stag Hill, Guildford, Surrey. Geological Society of London, *Engineering Geology Special Publication* Nº.2.

McQuillan, A. (2013). Comparison of photogrammetry and survey laser scanning output data for use in mapping joints in open cut highwalls. *2013 Coal Operators' Conference*. 14 – 15 February.

Miller, P., Mills, J., Edwards, S., Bryan, P., Marsh, S., Mitchell, H., Hobbs, P. (2008). A robust surface matching technique for coastal geohazard assessment and management. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63, 529-542.

Mills, J., Buckley, S., Mitchell, H., Clarke, P., Edwards, S. (2005). A geomatics data integration technique for coastal change monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 651-664.

Obanawa, H. (2015). Quantitative measurement of the topographic change at overhanging sea cliff with small UAV survey system. *Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS), 2015 IEEE International. 4684 - 4687

Oliveira, S., Catalão, J., Sousa, C., Dias, J.A. (2003). Aplicação de técnicas fotogramétricas e ambientes SIG no estudo do recuo da linha de costa – Área do Forte Novo – Trafal, Algarve. *Finisterra*, XXXVIII, 76, Lisboa, 35-49.

Oliveira, S., Catalão, J.; Ferreira, Ó., Alveirinho Dias, J. (2008). Evaluation of cliff retreat and beach nourishment in southern Portugal using photogrammetric techniques. *Journal of Coastal Research*, 24 (4c), 184-193. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749- 0208.

Poulton, C.V.L., Lee, J.R., Jones, L.D., Hobbs, P.R.N., Hall, M. (2006). Preliminary investigation into monitoring coastal erosion using terrestrial laser scanning: case study at Happisburgh, Norfolk, UK: *Bulletin of the Geological Society of Norfolk*, 56, 45-65.

Redweik, P., Marques, F., Matildes, R. (2008). A strategy for detection and measurement of the cliff retreat of the coast of Algarve (Portugal). *Earsel EProceedings Archive*, Vol. 7, N.º 2. 298-310.

- Redweik, P., Matildes, R., Marques, F., Santos, L. (2009). Photogrammetric methods for monitoring cliffs with low retreat rate. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1577- 1581. ICS2009 Proceedings. Portugal.
- Redweik, P., Roque, D., Marques, A., Matildes, R., Marques, F. (2010). Triangulating the Past: Recovering Portugal's Aerial Images Repository. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76 (9): 1007-1018.
- Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S.A., Allison, R.J. (2005). Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38, pp. 363-375. doi: 10.1144/1470-9236/05-008.
- Ružić, I., Marović I., Benac, C., Ilić, S. (2014). Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia. *Geo-Mar Lett*, 34:555–565
- Salvini, R., Fantozzi, P.L., Francioni, M., Riccucci, S., Bonciani, F., Mancini, S. (2011). Stability analysis of “Grotta delle Felci” Cliff (Capri Island, Italy): structural, engineering-geological, photogrammetric surveys and laser scanning. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 70, 549–557.
- Salvini, R., Francioni, M., Riccucci, S., Bonciani, F., Callegariv, I. (2013). Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps. *Geomorphology* 185, 110–122
- Sima, A., Buckley, S. J., Schneider, D., Howell, J. A. (2010). An improved workflow for image- and laser-based virtual geological outcrop modelling. In: Paparoditis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., Tournaire O. (Eds), *IAPRS*, Vol. XXXVIII, Part 3B – Saint-Mandé, France, September 1-3.
- Skarlatos, D., Kiparissi, S. (2012). Comparison of laser scanning photogrammetry and sfm-mvs pipeline applied in structures and artificial surfaces. *ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, no. 3, pp. 299-304.
- Snavely N., Seitz M. S., Szeliski, R. (2007). Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, Volume 80 Issue 2, November 2008, 189-210.
- Sturzenegger, M., Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laserscanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Eng. Geol.*, 106, 163–182, doi:10.1016/j.enggeo.2009.03.004, 2009
- Sunamura, T. e Horikawa, K. (1969). A study on erosion of coastal cliffs by using aerial photographs (Report nº 2). *Coastal Engineering in Japan*, v. 12, pp. 99-120.
- Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley, New York, 302 pp.
- Trenhaile, A. (1987). *Geomorphology of Rock Coasts*. Oxford, Oxford University Press.
- Walstra, J., Dixon, N., Chandler, J.H. (2007). Historical aerial photographs for landslide assessment: two case histories. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 40, 315 - 332. doi: 10.1144/1470-9236/07-011
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). ‘Structure-from-Motion’: photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314

Wu, C. (2011). VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. <http://ccwu.me/vsfm/>, 2011 (Acesso: Junho 2014)

Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S. (2011). Multicore Bundle Adjustment. *CVPR* 2011.

Wu, C. (2013). Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion, *Proceedings of the 2013 International Conference on 3D Vision*, p.127-134, June 29-July 01. doi>10.1109/3DV.2013.25

Young, A., Olsen, M., Driscoll, N., Flick, R., Gutierrez, R., Guza, R., Johnstone, E., Kuester, F. (2010). Comparison of Airborne and Terrestrial Lidar Estimates of Seacliff Erosion in Southern California. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76:421-427.

Zviely, D., Klein, M. (2004), Coastal cliff retreat rates at Beit-Yannay, Israel, in the 20th century. *Earth Surf. Process. Landforms*, 29: 175–184. doi:10.1002/esp.1019

3. Técnicas utilizadas na monitorização de arribas

American Society of Photogrammetry (1975). *Manual of Remote Sensing. Volume I – Theory, Instruments and Techniques*, First Edition. Virginia, USA.

American Society of Photogrammetry (1975). *Manual of Remote Sensing. Volume II – Interpretation and Applications*, First Edition. Virginia, USA.

Antonini, G., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2002). Surface Deposits and Landslide Inventory Map of the Area Affected by the 1997 Umbria–Marche Earthquakes. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 121 (2): 843– 853.

Berberan, A. (2003). *Elementos de Fotogrametria*, Lidel, Lisboa.

Buckley, S., Enge, H., Carlsson, C., Howell, J. (2009). Terrestrial Laser Scanning for use in Virtual Outcrop Geology. *Proceedings of RSPSoc 2009 Annual Conference*, 8-11th September 2009, Leicester, UK: 321-324.

Buckley, S.J., Howell, J.A., Enge, H.D., and Kurz, T.H. (2008). Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, London, v. 165 (3), pp. 625-638.

Chacón, J., Irigaray, Fernández, T. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull. Eng Geol Environ* (2006) 65: 341-411.

Congalton, R., Mead, R. (1983). A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 49, n.1, January 1983, p.69-74.

Eos Systems (2013). Photomodeler Scanner (versão 2013.1.0.1259 - final,full (64-bit)) [Software]. (Acesso a 9/02/2016: <http://photomodeler.com/products/scanner/default.html>)

Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S. (2009). Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2009) 522-528. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.003.

- Gaich, A., Pötsch, M., Schubert, W. (2006). Basics and application of 3D imaging systems with conventional and high-resolution cameras. *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization* (F. Tonon and J. Kottenstette, Eds.) ARMA, American Society of Rock Mechanics. 120p.
- García, F., Linares, F. (1997). El vuelo fotográfico de la “Serie A”. *Ería*, 43, pp.190-198.
- Glennie, C., Brooks, B., Ericksen, T., Hauser, D., Hudnut, K., Foster, J., Avery, J (2013). Compact Multipurpose Mobile Laser Scanning System — Initial Tests and Results. *Remote Sensing*, 5 (2):521-538, 2013.
- Gouveia, L. (2013). Susceptibilidade à ocorrência de movimentos nas arribas do litoral do concelho de Torres Vedras. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território. *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. Não publicada. 195 pp.
- Guzzetti, F. (2005). *Landslide Hazard and Risk Assessment*, Tese de Doutoramento, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Rheinischen Friedrich Wilhelms, *Universität Bonn*, 389 pp.
- Harris Geospatial Solutions. ENVI (versão 4.7) [software], 2009.
- Kennedy, J., Turner, K., Norton, B. (2006). LIDAR for Rock Mass Characterization: Hardware, Software, Accuracy and Best-Practices. *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization* (F. Tonon and J. Kottenstette, Eds.) ARMA, American Society of Rock Mechanics.
- Paine, D., Kiser, J. (2012). *Aerial Photography and Image Interpretation*, 3rd Edition. ISBN: 978-0-470-87938-2
- Kolecka, N. (2011). Photobased 3D scanning vs. laserscanning – competitive data acquisition methods for digital terrain modelling of steep mountain slopes. *ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. Proceedings of Volume XXXVIII-4/W19, 2011.
- Kurz, T. (2011). Integration of ground-based hyperspectral and lidar scanning in virtual outcrop geology. Dissertation for the degree philosophiae doctor (PhD) at the University of Bergen, Dep. of Earth Science.
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20, Vol. 25, n.12, 2365-2407.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2013). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter Textbook. pp.684.
- Marques, F. e Romariz, C. (1991). Preliminary note on sea cliff retreat. 4 Cong. Nac. Geotechnics, 2–4 Oct, Lisbon. Proc., 1, Port. Soc. Geotechnique, Lisbon, 57–66.
- Marques, F.M.S.F. (1994). Sea cliff evolution and related hazards in miocene terranes of Algarve (Portugal), 7th. Int. Cong. of the I.A.E.G., 5–9 Sep 1994, Lisbon. Proc., A. A. Balkema, Vol. 4, 3109–3118.
- Marques, F.M.S.F. (1997a). As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos. Dissertação de Doutoramento. *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. 556 pp.
- Marques, F. M. S. F. (1997b). Evolução de arribas litorais: Importância de estudos quantitativos na previsão de riscos e ordenamento da faixa costeira. *Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação EUROCOAST-PORTUGAL, Porto, p. 67-86.
- Marques, FM.S.F. (1998). Sea cliff retreat in Portugal: overview of existing quantitative data. V Congr. Nacional Geologia, 18-20 Nov. 1998, Lisboa. *Comunicações do IGM 84* (1): C 75-78.

Marques, F.M.S.F. (2006). A simple method for the measurement of cliff retreat from aerial photographs. *Zeitschrift für Geomorphologie - Supplementbände*, 144, 39-59.

Marques, F.M.S.F. (2009). Sea cliff instability hazard prevention and planning: examples of practice in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 56: 856 – 860.

Marques, F., Matildes, R., Redweik, P. (2011). Statistically based sea cliff instability hazard assessment of Burgau-Lagos coastal section (Algarve, Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 64: 927-931, 2011.

McCurdy, P. G (1944). *Manual of photogrammetry* (Preliminary ed). Pitman, New York

Poropat, G. V. (2006). Remote 3D Mapping of Rock Mass Structure. Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization (F. Tonon and J. Kottenstette, Eds.) ARMA, American Society of Rock Mechanics.

Redweik, P., Roque, D., Marques, A., Matildes, R., Marques, F. (2010). Triangulating the past-recovering Portugal's aerial images repository. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(9):1007--1018.

Rosa, M. (2013). Contributo para o Estudo da Evolução das Arribas no Litoral de Torres Vedras: Monitorização por Fotogrametria Aérea e Terrestre. Trabalho de Projeto submetido para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geográfica. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Não publicada. 126 pp.

Salvini, R., Francioni, M., Riccucci, S., Fantozzi, P.L., Bonciani, F., Mancini, S. (2001). Stability analysis of "Grotta delle Felci" Cliff (Capri Island, Italy): structural, engineering-geological, photogrammetric surveys and laser scanning. *Bull Eng Geol Environ* (2011) 70:549-557.

Sobreira, F., e MARQUES, F.M.S.F. (1994). The relevance of sea cliff retreat assessment in hazard estimation: an example in the western coast of Portugal. - 7th Internat. Congr. LA.E.G., 5-9 Sept. 1994, Lisbon, Proc. 4: 3119-3123, A. A. Balkema.

Strouth, A., Eberhardt, E. (2006). The use of LiDAR to overcome rock slope hazard data collection challenges at Afternoon Creek, Washington. Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization (F. Tonon and J. Kottenstette, Eds.) ARMA, American Society of Rock Mechanics.

Paine, D. P. e Kiser, J. D. (2012). *Aerial Photography and Image Interpretation*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118110997.ch1

Van Zuidam, R.A. (1985). *Aerial Photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Hague, 442 pp.

Wolf, P., Dewitt, B., Wilkinson, B. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th Edition. McGraw Hill. 676p.

4. Metodologias e algoritmos desenvolvidos

Barnhart, T., Benjamin, C. (2013). Comparing Two Methods of Surface Change Detection on an Evolving Thermokarst Using High-Temporal-Frequency Terrestrial Laser Scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sens.* 2013, 5, 2813-2837; doi:10.3390/rs5062813.

CloudCompare (version 2.6.2) [GPL software]. (2015). Retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>

- DeVore, R., Petrova, G., Hielsberg, M., Owens, L., Clack, B., Sood, A. (2013). Processing Terrain Point Cloud Data. *SIAM J. Imaging Sciences* Vol. 6, No. 1, pp. 1–31.
- Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D. G., Seidel, R. (1983). On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Trans. Inf. Theor.* IT-29, 4, 551-559.
- Edelsbrunner, H., Mücke E. (1994). Three-dimensional alpha shapes. *TOG* (1994), 43–72.
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G. (2005). Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3), 30–35.
- Hemsley, R. (2009). Interpolation on a magnetic field. <http://code.google.com/p/interpolate3d/>
- Jain, A., Murty, M., Flynn, P. (1999). Data clustering: A review. *ACM Comput. Surv.*, vol. 31, no. 3, pp. 264-323.
- Kuhn, D., Prüfer, S. (2014). Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany. *Geomorphology* Volume 213, 15 May 2014, Pages 153–165.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial *laser scanner*: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 (2013) 10–26.
- Leyge, A. (2014). Plane fit. For Use with MATLAB.
- (Acesso 2014: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/view_license?file_info_id=43305)
- Linsen, L. (2001). Point cloud representation. CS Technical Report, University of Karlsruhe, 2001.
- Lu, D., Mausel, P., Brondzio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25:12, 2365-2401, DOI:10.1080/0143116031000139863.
- MathWorks (2015). Matlab [Software]. (Acesso a 9/02/2016: http://www.mathworks.com/products/matlab/?s_tid=hp_fp_ml)
- Mémoli, F., Sapiro, G. (2004). Comparing Point Clouds. *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry*.
- Olsen, M. (2014). In Situ Change Analysis and Monitoring through Terrestrial Laser Scanning. *J. Comput. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000328, 04014040.
- Richter, R., Döllner, J. (2014). Concepts and techniques for integration, analysis and visualization of massive 3D point clouds. *Computers, Environment and Urban Systems* 45 (2014) 114–124.
- Rychkov, I., Brasington, J., Vericat, D. (2012). Computational and methodological aspects of terrestrial surface analysis based on point clouds. *Computers & Geosciences* 42, 64–70.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (4), 389–399.

Stumpf, A., Malet, J.-P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., Skupinski, G. (2014). Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.10.039

5. Exploração das técnicas para monitorização, inventariação e modelação de movimentos em fachadas de arribas

Brown, D.C. (1971). Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, pages 855-866

Buckley, S.J., Howell, H.D., Enge, H.D., Kurz, T.H. (2008). Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, London, 165 (2008), pp. 625–638

Buckley, S., Enge, H., Carlsson, C., Howell, J. (2009). Terrestrial Laser Scanning for use in Virtual Outcrop Geology. *Proceedings of RSPSoc 2009 Annual Conference*, 8-11th September 2009, Leicester, UK: 321-324.

CloudCompare (version 2.6.2) [GPL software]. EDF R&D, Telecom ParisTech (2015) – <http://www.cloudcompare.org/>

Dewez, T. (2014). Reconstructing 3D coastal cliffs from airborne oblique photographs without ground control points. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5.

Eos Systems Inc. (2013) Photomodeler Scanner [Software] v.2015

James, M.R., Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth* 2012, 117.

Kolecka, N. (2011). Photobased 3D scanning vs. laserscanning – competitive data acquisition methods for digital terrain modelling of steep mountain slopes. *ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. Proceedings of Volume XXXVIII-4/W19, 2011.

Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial *laser scanner*: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 (2013) 10–26.

Lichti, D.D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 (5), 307–324.

Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2*. pp. 1150–1157. doi:10.1109/ICCV.1999.790410

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2013). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter Textbook. pp.684.

Marques, F.M.S.F. (1997). As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos. Dissertação de Doutoramento. *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. 556 pp.

Marques, F.M.S.F. (2006). A simple method for the measurement of cliff retreat from aerial photographs, *Zeitschrift für Geomorphologie – Supplementbände*, 144, 39–59.

- Marques, F.M.S.F. (2013). Sea cliff instability susceptibility assessment at regional scale: a case study in the western coast of Portugal. VII Jornadas de Geomorfología Litoral, Oviedo, 17-19 de jul. 2013. *Geotemas* v. 14, p. 75-78.
- Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P. (2013). Entregável 1.4.1.1 a Definição de um quadro de referência a aplicar em projetos de intervenção nas arribas. *Relatório Técnico*, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P., Lisboa, junho 2013, 162 pp. (não publicado).
- Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., Maquaire, O., Letortu, P., Davidson, R. (2014). Landslide detection and monitoring capability of boatbased mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. *Landslides*, Technical Note. DOI 10.1007/s10346-014-0542-5
- Pereira, E., Bencatel, R., Correia, J., Félix, L., Gonçalves, G., Morgado, J., Sousa, J. (2009). Unmanned Air Vehicles for coastal environmental research. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium), 1557 – 1561. Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258.
- Pesci, A., Teza, G., (2008). Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach. *Annals of Geophysics* 51 (5/6), 839–848
- Silva, N. (2014). Crónicas Militares Nacionais: Exercício REP 14 da Marinha Portuguesa. *Revista Militar* N.º 2551/2552 - Agosto/Setembro 2014, pp 783 - 788.
- Snavely, N., Seitz, S., Szeliski, R. (2006). Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. In: *Proceedings of SIGGRAPH 2006*, pp. 835–846.
- Snavely N., Seitz M. S., Szeliski, R. (2007). Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, Volume 80 Issue 2, November 2008, 189-210.
- Soudarissanane, S., Van Ree, J., Bucksch, A., Lindenbergh, R. (2007). Error Budget of Terrestrial Laser Scanning: Influence of the Incidence Angle on the Scan Quality, In: *Proc. 3D-NordOst*, pp. 1–8. pp. 73–81.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti M., Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (2011) 389–399
- Walford, A. (2013). Using the GoPro Hero 3 for 3D Photogrammetry Modeling and Measuring. <http://info.photomodeler.com/blog/bid/315899/Using-the-GoPro-Hero-3-for-3D-Photogrammetry-Modeling-and-Measuring> (Accessed June 2014)
- Wolf, P., Dewitt, B., Wilkinson, B. (2014). Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 4th Edition. McGraw Hill. 676p.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S. (2011). Multicore Bundle Adjustment. *CVPR* 2011.
- Wu, C. (2013). Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion, *Proceedings of the 2013 International Conference on 3D Vision*, p.127-134, June 29-July 01. doi>10.1109/3DV.2013.25
- Zhang, Z. (1994). Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13:2, 119-152 (1994)

6. Suscetibilidade à ocorrência de movimentos em fachadas de arribas – Caso de estudo de Ribeira de Ilhas

Bewick, V., Cheek, L., Ball, J. (2005). Statistics review 14: Logistic regression. *Critical Care* 2005, 9:112-118 (DOI 10.1186/cc3045)

Boak, E., Turner, I. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*: Volume 21, Issue 4: pp. 688 – 703.

Brabb, E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard mapping. *4th International Symposium on Landslides*, Toronto, 1 (1984), pp. 307–324.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht: 135-175.

Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111 (2010) 62–72.

Guzzetti, F. (2005). Landslide hazard and risk assessment: concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslide susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. PhD thesis. Mathematischnaturwissenschaftliche Fakultät da Rheinischen Friedrich-Wilhelms, Bona University.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale, *Geomorphology*, 72, 272–299.

Hosmer, D., Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. John Wiley & Sons.

Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z). *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82: 10-26.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2013). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter Textbook. pp.684.

Marôco, J. P. (2014). *Análise Estatística com o SPSS Statistics*. Ed. 6. Pêro Pinheiro: ReportNumber.

Marques, F. M. S. F. (2006a). A simple method for the measurement of cliff retreat from aerial photographs, *Z. Geomorphol. – Supplementbände*, 144, 39–59.

Marques, F. M. S. F. (2006b). Rates, patterns and timing of cliff retreat. A case study on the west coast of Portugal, *Z. Geomorphol. – Supplementbände*, 144, 231–257.

Marques, F. M. S. F., Matildes, R., Redweik, P. (2013). Sea cliff instability susceptibility at regional scale: a statistically based assessment in the southern Algarve, Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 3185–3203.

Marques, R. (2013). Estudo de movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores): inventariação, caracterização e análise da susceptibilidade. Tese realizada para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Riscos Geológicos. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências.

Pires, H. (1989) – Alguns aspectos do clima de agitação marítima de interesse para a navegação na costa de Portugal. *O Clima de Portugal*, Fasc. XXXVII, vol. 2, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa, 34 pp.

Soeters, R., van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Washington, pp 129–177.

Yin, K., Yan, T. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks - *Landslides, proceedings of Fifth International Symposium on Landslides*, Vol. 2, pp. 1269-1271.

7. Considerações finais

Löwner, M.-O. (2010a). New GML-Based Application Schema for Landforms, Processes and Their Interaction. J.-C. Otto, R. Dikau (eds.), *Landform – Structure, Evolution, Process Control, Lecture Notes in Earth Sciences* 115, DOI 10.1007/978-3-540-75761-0_2.

Löwner, M.-O. (2010b). On Problems and Benefits of 3D Topology on Under-Specified Geometries in Geomorphology. J. Pouliot et al. (eds), *Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, DOI: 10.1007/978-3-642-29793-9_9.

Löwner, M.-O. (2013a). 3D topological relationships of landforms and their spatial schema-based representation. *Geo-spatial Information Science*, Vol. 16, No. 4, 238–246, <http://dx.doi.org/10.1080/10095020.2013.866616>.

Löwner, M.-O., Becker, T. (2013b). Topological framework for the temporal aspects of landform development. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-2/W1, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27 – 29 November 2013, Istanbul, Turkey.

Marques, F.M.S.F. (1997). As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 556 pp.

Stumpf, A., Malet, J.-P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., Skupinski, G. (2014). Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.10.039.

Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley, New York, 302 pp.

Software utilizado

ArcGIS 10.3 (Esri) - <http://desktop.arcgis.com/en/desktop/>

CloudCompare (version 2.6.2) [GPL software]. EDF R&D, Telecom ParisTech (2015) – <http://www.cloudcompare.org/>

IBM SPSS Statistics - <http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/products/statistics/>

MathWorks (2015). Matlab [Software]. http://www.mathworks.com/products/matlab/?s_tid=hp_fp_ml

PhotoModeler Scanner (EOS Systems) - <http://photomodeler.com/products/scanner/default.html>

Quick Terrain Modeler (Applied Imagery) - <http://appliedimagery.com/>

RealWorks (Trimble) - <http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/realworks.aspx>

Cartografia e informação geológica, Cartas Geológicas e respetivas Notícias Explicativas

Folha Geológica 30-A Lourinhã, 2ª Edição, 1996. Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50.000. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Folha Geológica 34-C Cascais, 4ª Edição, 1999. Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50.000. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Folha 402-Mafra, 2005. Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:25.000. Protocolo de Colaboração para o Desenvolvimento da Cartografia Geológica na AML. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa.

Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P. (2013d). Entregável 1.4.1.1.a Definição de um quadro de referência a aplicar em projetos de intervenção nas arribas. *Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P.*, Lisboa, junho 2013, 162 p. (não publicado).

(http://www.apambiente.pt/_zdata/PoliticAs/Agua/Ordenamento/SistemaMonitorizacaoLitoral/E_1.4.1.1.a%20Quadro%20referencia%20arribas.pdf)

ANEXO

Foi desenvolvida uma aplicação *web*, baseada nos *templates* gratuitos da plataforma ArcGIS Online (ESRI), com o objetivo de mostrar como se pode facilmente disponibilizar informação no seu formato 3D a qualquer utilizador interessado, via *web*.

Esta aplicação consiste no *template* Map Journal, que contém secções com diferentes conteúdos, por onde o utilizador pode navegar. Funcionalidades como *zoom*, *pan*, inquirições aos dados e combinações de camadas de informação geográfica podem ser utilizadas, como se se tratasse de um SIG muito simplificado.

Nesta aplicação, a que se deu o nome de “Dados das praias trabalhadas” e que se pode aceder através do URL <http://arcg.is/1QYKzLG>, encontram-se disponíveis informações relativas a três dos quatro casos de estudo, apresentadas da seguinte forma:

- Mapa *web* de enquadramento das 10 praias trabalhadas, acompanhado por texto introdutório e imagem;
- *Web scene* 3D de nuvem de pontos e movimentos detetados entre 2012 e 2013 no talude de acesso à praia do Porto da Calada, em formato 3D, com possibilidade de visualizar duas camadas de informação: nuvem de pontos da arriba e movimentos;
- *Web scene* 3D de nuvem de pontos classificada de acordo com a probabilidade de ocorrência de movimentos na praia de Ribeira de Ilhas, com texto informativo e imagem de vídeo da praia em tempo real embebido (a partir das câmaras disponibilizadas pela página <https://beachcam.sapo.pt/>);
- *Web scene* 3D de nuvem de pontos da praia da Bafureira e movimentos detetados de 2012 a 2014.



Figura 151 - Mapa web de enquadramento das 10 praias trabalhadas.



Figura 152 – Carregamento da web scene 3D dentro da aplicação web: são carregados os dados em formato 3D.

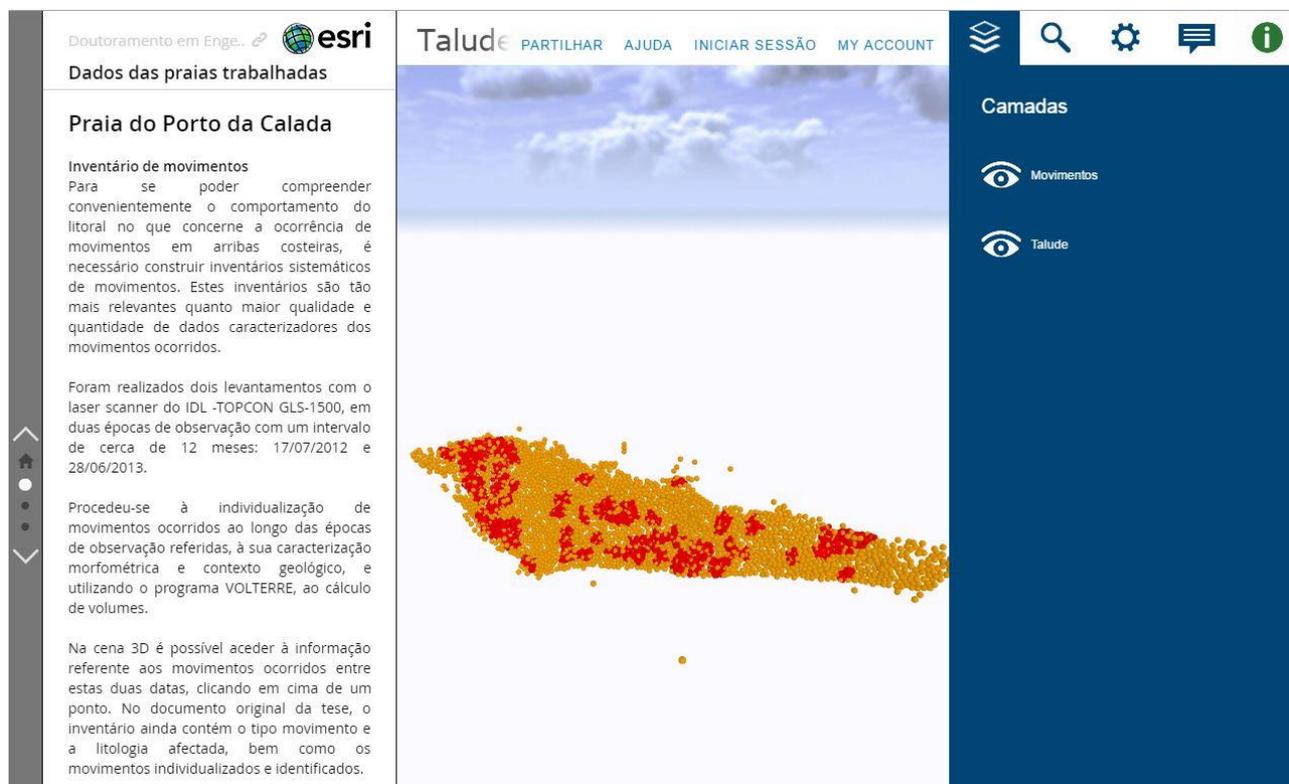


Figura 153 - Web scene 3D de nuvem de pontos e movimentos detetados entre 2012 e 2013 no talude de acesso à praia do Porto da Calada, em formato 3D, com possibilidade de visualizar nuvem de pontos da arriba e/ou movimentos.

Doutoramento em Enge.

Dados das praias trabalhadas

Praia do Porto da Calada

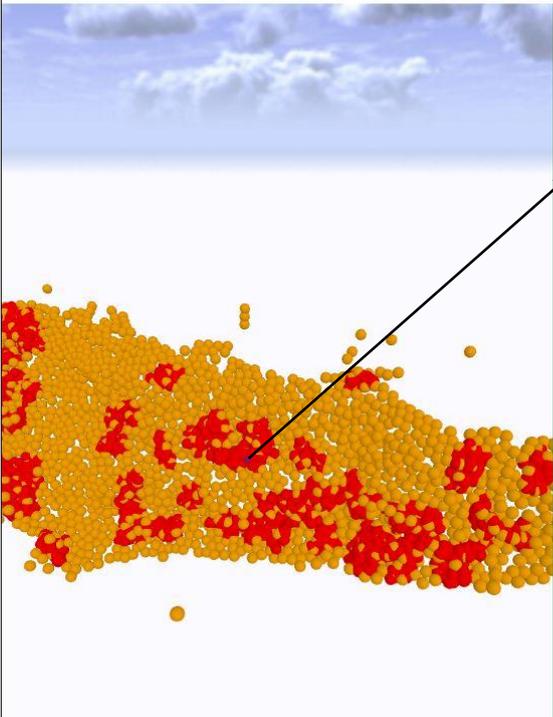
Inventário de movimentos
Para se poder compreender convenientemente o comportamento do litoral no que concerne a ocorrência de movimentos em arribas costeiras, é necessário construir inventários sistemáticos de movimentos. Estes inventários são tão mais relevantes quanto maior qualidade e quantidade de dados caracterizadores dos movimentos ocorridos.

Foram realizados dois levantamentos com o laser scanner do IDL -TOPCON GLS-1500, em duas épocas de observação com um intervalo de cerca de 12 meses: 17/07/2012 e 28/06/2013.

Procedeu-se à individualização de movimentos ocorridos ao longo das épocas de observação referidas, à sua caracterização morfométrica e contexto geológico, e utilizando o programa VOLTERRE, ao cálculo de volumes.

Na cena 3D é possível aceder à informação referente aos movimentos ocorridos entre estas duas datas, clicando em cima de um ponto. No documento original da tese, o inventário ainda contém o tipo movimento e a litologia afectada, bem como os movimentos individualizados e identificados.

Talude PARTILHAR AJUDA INICIAR SESSÃO MY ACCOUNT



Informações

Movimentos_Gen0Shape934

Atributos	
Altura	4.4646
Area	6.1162
ClusterID	131
Largura	1.3699
OBJECTID	935
Volume	6.7845
X	-111123.46900000001
Y	-69754.609
Z	58.086

Doutoramento em Enge.

Dados das praias trabalhadas

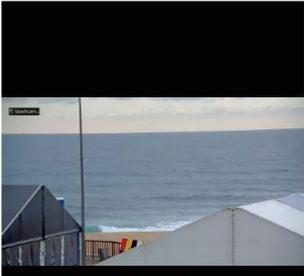
Praia de Ribeira de Ilhas

Susceptibilidade à ocorrência de movimentos
A regressão logística é um caso de regressão categorial que melhor se aplica à análise da susceptibilidade à ocorrência de movimentos uma vez que esta variável, que é a dependente, é dicotómica ou binária – o movimento ocorre (1) ou não ocorre (0) (mutuamente exclusiva).

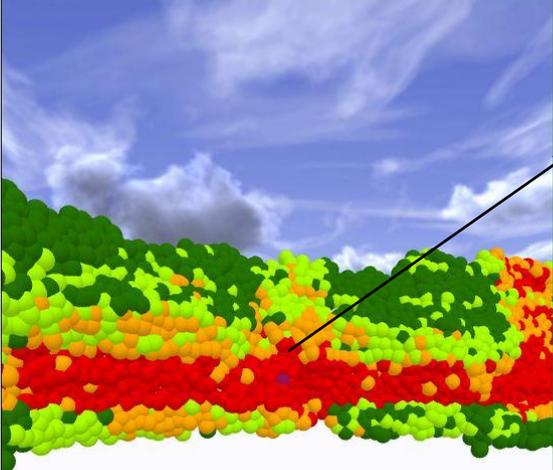
A resposta é a presença/ausência de um movimento numa dada unidade de terreno, e as variáveis independentes são o conjunto de factores ambientais descritos para cada uma das unidades de terreno.

O modelo de ajuste determinado pela regressão logística verificou-se ser de qualidade razoável relativamente à sua capacidade preditiva, tendo apresentado um valor de 0.737 de AAC (ROC).

A legenda do mapa deve ler-se do verde ao vermelho como valores crescentes de probabilidade de ocorrência.



RIlhas PARTILHAR AJUDA INICIAR SESSÃO MY ACCOUNT



Informações

Probabilidade_Gen0Shape819

Atributos	
OBJECTID	820
Prob_AACT3	0.255254
X	-111566.984
Y	-74561.898
Z	10.164

Figura 154 - Possibilidade de inquirição aos dados e consulta de atributos das camadas de informação.

Doutoramento em Enge... **Bafureira** PARTILHAR AJUDA INICIAR SESSÃO MY ACCOUNT

Dados das praias trabalhadas

Praia da Bafureira (S. Pedro do Estoril)

Monitorização de alterações
Na praia da Bafureira foram realizadas 4 épocas de observação com levantamento fotogramétrico, em duas das quais se realizaram simultaneamente levantamentos com laser scanner.

A monitorização anual das arribas da praia da Bafureira permitiu verificar as alterações ocorridas entre cada época de observação e a divisão em sectores permitiu ainda verificar que é o sector 3 aquele que mais alteração apresenta em cada intervalo de tempo.

As épocas de observação sequenciais permitiram ainda verificar que, pontualmente nos outros sectores, ocorrem alterações de maior magnitude. Entre as épocas FT2 e FT3, cujo intervalo de tempo é de 6 meses, todos os sectores sofreram alterações mais significativas que nos intervalos temporais das épocas anteriores, de 12 meses. Acrescenta-se ainda que o intervalo de tempo entre FT2 e FT3 corresponde ao período de Abril a Outubro, época seca.

Camadas

- Volume perdido 27-03-2012 a 0...
- Arriba situação 23-10-2014

Figura 155 - Web scene 3D de nuvem de pontos e movimentos detetados, com especial enfoque no streaming de vídeo da camera da praia de São Pedro do Estoril (<https://beachcam.sapo.pt/>).