

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Maria João Felicidade da Luz Pereira

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO
PARA CLASSIFICAÇÃO DE ROCHA ORNAMENTAL
CARBONATADA**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas orientada pela Professora Doutora Lídia Maria Gil Catarino e pelo Doutor João António Marques Duarte apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Maria João Felicidade da Luz Pereira

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO
PARA CLASSIFICAÇÃO DE ROCHA ORNAMENTAL
CARBONATADA**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas orientada pela Professora Doutora Lídia Maria Gil Catarino e pelo Doutor João António Marques Duarte apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022

Resumo

Na presente dissertação, o trabalho desenvolvido tem como principais objetivos a aplicação do método da fotogrametria e utilização de técnicas de Classificação Automática como ferramentas de apoio à identificação geológica, caracterização e classificação de pedreiras.

Para aplicação destas técnicas, foi utilizado um veículo aéreo não transportado (VANT) para o levantamento aerofotográfico das pedreiras e posteriormente para se proceder à criação dos modelos 2D e 3D, foi utilizado o programa *Agisoft Metashape* e na classificação temática utilizou-se o programa *QGIS*. Duas das principais características a ter em consideração nos maciços rochosos são a sua cor e orientação.

A metodologia proposta integrou pesquisa bibliográfica e trabalho de gabinete, contando também com uma componente de trabalho de campo, e teve em consideração três condições fundamentais: simplicidade, baixo custo e resultados fidedignos.

O estudo foi efetuado em duas pedreiras localizadas no Concelho de Ourém, freguesia de Fátima, mais precisamente no Valinho de Fátima, em duas empresas da indústria extrativa de blocos calcários com finalidades ornamentais, nomeadamente a empresa Eduardo Marques & Rosa e Ovelheiro & Filhos Lda.

Numa primeira fase, foi identificada uma área de interesse e foram realizados, em dias, horas e condições atmosféricas diferentes, os levantamentos fotogramétricos de maneira a evidenciar as principais diferenças geradas nestes. Numa segunda fase, realizou-se a classificação temática e caracterização desses mesmos modelos em ambiente *QGIS*, sendo posteriormente inferidas as condições ideais para um melhor desempenho das técnicas utilizadas.

Em conclusão podemos referir que é possível efetuar a identificação geológica de material carbonatado, tendo em conta que existem limitações inerentes à área de interesse, nomeadamente as características próprias da indústria extrativa, embora os resultados obtidos estejam muito dependentes dos procedimentos e condições de obtenção das imagens, e do método de atribuição de áreas de interesse na classificação supervisionada.

Palavras-chave: Pedreira, fotogrametria, classificação automática, colorimetria, VANT

Abstract

In this dissertation, the main goals of the work are to apply the photogrammetry method and use of Automatic Classification techniques as tools to support geological identification, characterization and a classification of quarries.

For the application of these techniques, an unmanned aerial vehicle (UAV) was used for the aerophotographic survey of the quarries and later to create models 2D and 3D, the *Agisoft Metashape* program was used and the *QGIS* program was used in the thematic classification. Two of the main features to be considered in the rocky massifs are their color and orientation.

The proposed methodology integrates bibliographic research and office work, including a field work component, and considers three fundamental conditions: simplicity, low cost and reliable results.

The study was carried out in two quarries located in the county of Ourém, parish of Fátima more precisely in Valinho de Fátima, in two companies of the extractive industry of limestone blocks for ornamental purposes, specifically the company Eduardo Marques & Rosa and Ovelheiro & Filhos Lda.

In a first phase, an area of interest was identified, and photogrammetric surveys were carried out in different days, hours, and atmospheric conditions to highlight the main differences generated in these. In a second phase, the thematic classification and characteristics of these same models were performed in *QGIS* environment, and later the ideal conditions for a better performance of the techniques used were inferred.

In conclusion, we can mention that it is possible to make the geological identification of carbonated material, considering that there are limitations inherent to the area of interest, in particular the characteristics of the extractive industry, although the results obtained are very dependent on the procedures and conditions of obtaining the images, and the method of assigning areas of interest in the supervised classification.

Keywords: Quarry, photogrammetry, automatic classification, colorimetry, UAV

Agradecimentos:

Durante a realização da presente dissertação foi necessária a disponibilidade e colaboração, de diversas pessoas e entidades, que se disponibilizaram, a prestar o seu apoio. Por isso, com a finalização de mais uma etapa do meu percurso académico, gostaria de deixar um agradecimento especial a essas pessoas.

Em particular ao Doutor João António Marques Duarte, meu orientador científico, por toda a orientação e ensinamentos transmitidos ao longos destes meses, e pela oportunidade de conhecer outros métodos de aquisição de dados geológicos que não foram utilizados nesta dissertação, mas que ajudaram a expandir os meus conhecimentos em várias áreas da Engenharia Geológica.

À Professora Doutora Lídia Maria Gil Catarino, minha orientadora, pela sua disponibilidade e ensinamentos transmitidos, bem como pelos aconselhamentos e sugestões na planificação e execução deste trabalho.

Agradecimento ao Professor Doutor Pedro Costa, pelos esclarecimentos prestados relativos à aplicação de softwares SIG.

Um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional durante todo o meu percurso académico.

Um obrigado aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio motivacional e por todas as experiências que vivemos que contribuíram para a ultrapassagem das fases difíceis que surgiram no decorrer da presente dissertação.

Ao meu namorado, por todo o carinho, ajuda, motivação e paciência durante este período.

Ao Departamento de Ciências da Terra e aos docentes que me transmitiram os conhecimentos que possuo atualmente e que permitiram a minha formação, bem como as pessoas do laboratório com quem tive o prazer de conviver durante o período que estive a realizar o presente trabalho.

Um especial agradecimento à firma Eduardo Marques & Rosa, especialmente aos seus sócios, Sr. Eduardo Pereira Marques e Sr. Luís António Pereira Rosa, pela compreensão na elaboração deste trabalho, assim como na permissão da utilização dos terrenos para a execução dos levantamentos efetuados. Um agradecimento especial também à empresa Ovelheiro & Filhos Lda, que permitiu a execução dos levantamentos nos seus terrenos.

Muito Obrigada a Todos!

Índice

Resumo.....	ii
Agradecimentos.....	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	x
Capítulo 1 - Considerações iniciais.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	3
Capítulo 2 – Princípios teóricos e considerações experimentais.....	5
2.1 Detecção Remota	5
2.1.1 Radiação Eletromagnética	6
2.1.2 Refletância	8
2.2. Fotogrametria	8
2.3 Processamento e classificação de imagens digitais.....	10
2.4 Colorimetria	12
2.5 Características de equipamentos	13
2.5.1 Veículo aéreo não tripulado	13
2.5.2 Resolução do Sensor.....	15
Capítulo 3 – Caracterização da área de estudo.....	17
3.1 Enquadramento geográfico	17
3.2. Enquadramento geomorfológico e geológico.....	18
Capítulo 4 – Métodos e metodologia	21
4.1 Trabalho de campo	21
4.2 Processamento de imagens.....	27
4.3 Processamento e classificação no <i>QGIS</i>	33
4.4 Validação de Resultados.....	36
4.5 Medições de cor com espectrofotômetro	37
Capítulo 5 - Análise e Discussão de Resultados	42
5.1 Fotointerpretação de Ortofotomapas.....	42
5.2 Classificação Automática	46
5.2.1 Dados de classificação	48
5.2.2 Validação de resultados.....	49
5.2.3 Discussão	50

5.2.4 Discussão entre modelos classificados	52
5.2.5 Correlação da cartografia de campo com os resultados da classificação	53
5.3 Correlação com a componente de colorimetria de amostra de mão	55
5.4 Limitações dos métodos e metodologias.....	57
Capítulo 6 - Considerações finais.....	59
6.1 Conclusões	59
6.2 Trabalhos Futuros.....	61
Referências Bibliográficas:	63
ANEXOS.....	69

Índice de Figuras

Figura 1: Divisão do espectro eletromagnético com ênfase na região do visível.....	7
Figura 2: Diagrama com as tecnologias que englobam o geoprocessamento.....	10
Figura 3: Relação entre a imagem/ <i>pixel</i> e o terreno /GSD	14
Figura 4: Localização da área de estudo no mapa de Portugal e em fotografia aérea obtida no Google Earth.	17
Figura 5: Localização da área de estudo (assinalada no círculo a vermelho) no excerto da folha nº 309 de Vila Nova de Ourém da Carta Militar, à escala 1:50 000, Datum: EPSG 3763	18
Figura 6: Representação das áreas de exploração nas unidades geológicas aflorantes na área de estudo (Calcário de Moleanos) (delimitado a vermelho na carta e assinalado a vermelho na legenda). Extrato da Carta Geológica de Portugal 27-A, à escala 1:50000.	19
Figura 7: Diagrama da metodologia adotada.....	21
Figura 8: Modelo de VANT utilizado no levantamento aerofotográfico. (A- vista superior, B- vista inferior).....	22
Figura 9: <i>Chessboard pattern</i> utilizado na calibração da câmara.....	23
Figura 10: Malha de voo efetuada na app <i>Drone Deploy</i> correspondente ao dia 4/4/2022 (A) e dia 27/05/2022 (B). Fonte: Captura de ecrã da aplicação <i>Drone Deploy</i>	25
Figura 11: Localização da câmara e da sobreposição das imagens, nos dias 04/04/2022 10:00 (A) dia 04/04/2022 12:00 (B), 27/05/2022 10:00 (C). Fonte: <i>Agisoft Metashape</i>	26
Figura 12: Diagrama representativo do processo fotogramétrico com a descrição dos passos a desenvolver no <i>Agisoft Metashape</i>	27
Figura 13: Exemplo do alinhamento das fotografias no <i>Agisoft Metashape</i> e respetivo posicionamento do dispositivo aquando da captura das fotografias do voo 04/04/2022 12:00 (Fonte: <i>Agisoft Metashape</i>).....	28
Figura 14 – Exemplo da visualização da nuvem densa de pontos.....	29
Figura 15 – Imagem correspondente à introdução dos pontos de controle (GCP) no modelo.	30
Figura 16 – Imagem correspondente à construção da malha poligonal 3D.....	31
Figura 17 – Imagem correspondente ao MDE exemplificativo.....	32
Figura 18 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 04/04/2022 12.00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas...32	
Figura 19: Combinação de cor natural, composição RGB 1-2-3 (A); e as composições de falsa cor RGB 3-2-1 (B) e composição 3-1-2 (C)	34
Figura 20: Representação de algumas das ROI's coletadas para as diferentes classes de interesse de calcário e solo (A) e (B), no ortofotomapa do dia 04/04/2022 12:00.....	35
Figura 21: Espetrofotómetro portátil utilizado na determinação da cor (refletância) das amostras de rocha da área em estudo.....	38
Figura 22: Sistema de cor CIELAB.....	39
Figura 23: Sistema de cor RGB.....	39

Figura 24: Sequência do material calcário identificado na pedreira EM&R	39
Figura 25: Imagem das pedreiras em estudo com a informação dos tipos de calcário aflorantes	40
Figura 26: Amostras de rocha recolhidas <i>in situ</i> (1 a 8).	40
Figura 27: Recorte da área da pedreira do dia 04/04/2022 10:00.	42
Figura 28: Recorte da área da pedreira do dia 04/04/2022 12:00	43
Figura 29: Recorte da área da pedreira do dia 04/04/2022 12:00, editada com <i>GIMP</i>	43
Figura 30: Recorte da área da pedreira do dia 17/03/2022	44
Figura 31: Recorte da área da pedreira do dia 27/05/2022	44
Figura 32: Mapa temático cobertura da terra resultante da classificação automática para o voo 04/04/2022 10:00, à escala 1:1500 (A), 04/04/2022 12:00, à escala 1:1550 (B) 27/05/2022, à escala 1:1200 (C).	47
Figura 33: Comportamento espectral (refletância) das classes mapeadas nas 3 bandas disponíveis para o voo 04/04/2022 10:00, onde consta o valor da refletância (0-255) versus comprimento de onda (número da banda)	48
Figura 34: Sobreposição da cartografia de campo com os resultados da classificação supervisionada para o dia 27/05/2022.....	54
Figura 35: Gráfico com as assinaturas espectrais das amostras de calcárias, medidas em laboratório com o espectrofotômetro modelo Konica Minolta CM-700D.	56
Figura A1: Mapa geológico do MCE com indicação das principais pedreiras e núcleos de indústria extrativa (geologia adaptada das cartas geológicas 1/50000 do LNEG) e com destaque nas pedreiras em estudo (assinaladas a vermelho).	70
Figura A2: Litostratigrafia do MCE.....	71
Figura A3 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 04/04/2022 10.00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.. ..	72
Figura A4 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 04/04/2022 12.00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas, editado no <i>GIMP</i>	72
Figura A5 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 27/05/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.	73
Figura A6 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 17/03/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.	73
Figura A7 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 04/04/2022 10:00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.....	74
Figura A8 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 04/04/2022 12:00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.....	74
Figura A9 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 04/04/2022 12:00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720, editado no <i>GIMP</i>	75
Figura A10 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 27/05/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.	75

Figura A11 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 17/03/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.....	76
Figura A12: Classificação 04/04/2022 10:00, com ampliação na pedreira EM&R.....	76
Figura A13: Classificação 04/04/2022 10:00, com ampliação na pedreira Lagoa nº 6720. ..	77
Figura A14: Classificação 04/04/2022 12:00, com ampliação na pedreira EM&R.....	77
Figura A15: Classificação 04/04/2022 12:00, com ampliação na pedreira Lagoa nº 6720. ..	78
Figura A16: Classificação 27/05/2022, com ampliação na pedreira EM&R.....	78
Figura A17: Classificação 27/05/2022, com ampliação na pedreira Lagoa nº 6720.	79
Figura A18: Curvas espectrais com valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada no ortofotomapa do dia 04/04/2022 10:00.....	79
Figura A19: Comportamento espectral (refletância) das classes mapeadas nas 3 bandas disponíveis para o dia 04/04/2022 12:00, onde consta o valor da refletância (0-255) versus comprimento de onda (número da banda).	80
Figura A20: Curvas espectrais com valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada, no ortofotomapa do dia 04/04/2022 12:00.....	81
Figura A21: Comportamento espectral (refletância) das classes mapeadas nas 3 bandas disponíveis do dia 27/05/2022, onde consta o valor da refletância (0-255) versus comprimento de onda (número da banda).....	82
Figura A22: Curvas espectrais com valores de refletância máximo e mínimos para cada classe mapeada do dia 27/05/2022.....	82

Índice de Tabelas:

Tabela 1. Intervalos espectrais usados em Detecção Remota	6
Tabela 2: Características da aeronave utilizada na captura de imagens	22
Tabela 3: Configurações fotográficas da câmara do VANT utilizado (<i>DJI Phantom 4</i>)	23
Tabela 4: Informação de aquisição das fotografias de todos os voos realizados.	24
Tabela 5- Parâmetros utilizados no alinhamento das fotografias.	28
Tabela 6 – Parâmetros utilizados na construção da nuvem densa de pontos.....	29
Tabela 7 – Parâmetros utilizados na construção da malha poligonal 3D	30
Tabela 8– Parâmetros utilizados na construção da textura.....	31
Tabela 9 – Critérios utilizados na avaliação do grau de concordância da classificação temática com base no índice Kappa.....	37
Tabela 10 – Especificações técnicas do espectrofotômetro utilizado no estudo	38
Tabela 11 – Parâmetros de processamento para os modelos, com as definições baixas, médias e altas.	45
Tabela 12: Valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada, no ortofotomapa do dia 04/04/22 10:00	48
Tabela 13: Valores de refletância média no ortofotomapa do dia 04/04/2022 10:00, para cada classe mapeada e atribuição da composição RGB à cor correspondente.	48
Tabela 14: Matriz de erro baseado na contagem de <i>píxeis</i> da imagem 04/04/2022 pelas 10:00.	49
Tabela 15: Matriz de erro baseado na contagem de <i>píxeis</i> da imagem 04/04/2022 pelas 12:00..	49
Tabela 16: Matriz de erro baseado na contagem de <i>píxeis</i> da imagem 27/05/2022.....	50
Tabela 17: Compilação das composições RGB (cor) para as diferentes classes de interesse das imagens classificadas.	53
Tabela 18: Valores médios de refletância das amostras de mão de litologia calcária.....	56
Tabela A1: Valores de refletância máximo e mínimos para cada classe mapeada, no ortofotomapa do dia 04/04/2022 12:00.....	80
Tabela A2: Valores de refletância média do dia 04/04/2022 12:00, para cada classe mapeada e atribuição da composição RGB à cor correspondente.....	80
Tabela A3: Valores de refletância máximo e mínimos para cada classe mapeada, no ortofotomapa do dia 27/05/2022.....	81
Tabela A4: Valores de refletância média do dia 27/05/2022, para cada classe mapeada e atribuição da composição RGB à cor correspondente.....	81

Lista de abreviaturas:

Bits – Números de dígitos binários

GPC ou GCP - Ground Point Control; Ground Control Points

GPS - Global Positioning System

GSD - Ground Sampling Distance

DR - Detecção Remota

EM&R - Eduardo Marques & Rosa, Lda.

IA - Inteligência Artificial

ISO -Intervalo de sensibilidade fotográfica

KMZ - Keyhole Markup language zipped

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

MCE- Maciço Calcário Estremenho

Mesh - Malha poligonal.

MDE - Modelo Digital de Elevação

ML - Machine Learning

ND - Número Digital

Pix – Pixel (elemento de imagem)

REM - Radiação Eletromagnética

RGB - Red, Green, Blue

ROI – Region of Interest; Região de interesse; área de treino

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SCP - Semi-Automatic Classification Plugin ou Plugin de Classificação Semi-Automática

SFM – Structure from Motion

SWIR – Short- wave Infrared

UTM - Universal Transverse Mercator

VANT ou **UAV** – Veículo aéreo não tripulado ou Unmanned Aerial System

VNIR - Visible to Near Infra-Red

WGS - World Geodetic System

Capítulo 1 - Considerações iniciais

1.1 Introdução

O mercado das rochas ornamentais, seguindo a normal evolução das empresas, têm evoluído no sentido de uma maior competitividade, e por isso, as empresas têm apostado, cada vez mais, em amplas campanhas de prospecção, pesquisa, reconhecimento, valorização e aproveitamento dos recursos geológicos de maneira mais sustentável (Martins, 2010).

Assim, deve implementar-se a procura de materiais e a sua exploração sustentável, através do desenvolvimento de metodologias de prospecção de recursos que utilizem técnicas menos invasivas e que permitam determinar com rigor as características geológicas dos maciços, de modo a garantir a instalação de pedreiras em locais com a matéria-prima e as características procuradas no mercado que seja economicamente viável (Duarte, 2018).

Com a evolução dos novos recursos tecnológicos, a Indústria 4.0 têm ganho a atenção de diversos setores da indústria uma vez que está conotada a um ponto chave: a maior eficiência das operações. Para além do aumento da eficiência, a Indústria 4.0, se bem aplicada, pode levar a melhores condições de trabalho, maior assertividade na tomada de decisões e redução no custo de operação, entre outros (Gonçalves, s.d.). Assim, o conceito da Indústria 4.0 na exploração de pedreiras têm sido marcado pelo uso de tecnologias que permitem a otimização da cadeia de produção, pela automação, inovações digitais, troca e análise de dados, permitindo fornecer informações importantes, na fase de prospecção de recursos, bem como na fase de exploração.

Têm-se verificado, cada vez mais, a utilização de deteção remota na área geológica, servindo de suporte prévio aos trabalhos de campo a realizar, e permitindo efetuar um reconhecimento genérico da região alvo de estudo. Neste caso em particular, o foco está na litologia e na cor associada aos diferentes tipos de rocha ornamental carbonatada.

Algumas das tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas ao setor extrativo, recorrem à utilização dos veículos aéreos não tripulados (VANT's), que permitem a redução de tempo e custo na recolha de dados com boa resolução e obter informação de locais com difícil acesso, promovendo assim maior segurança para as pessoas durante a aquisição. Os VANT's embora tenham surgido na época da segunda guerra mundial por necessidades militares (Watts *et al.*, 2012), são atualmente utilizados para as mais diversas finalidades, tais como: a monitorização de obras de difícil acesso, avaliação de estruturas, documentação arqueológica, na agricultura de precisão, e na criação de ortofotomapas.

Para além da aquisição de dados recorrendo ao VANT's, a utilização de técnicas de *Machine Learning* (ML) (ou Aprendizagem de máquina) também pode ser aplicada na redução de custos. O ML é um ramo da Inteligência Artificial, baseado na ideia de que os sistemas informáticos podem aprender com dados, identificar padrões e tomar decisões com o mínimo de intervenção humana, tratando-se de um método de análise de dados que automatiza a construção de modelos baseados em dados de amostras (SAS, s.d.).

O processamento digital de imagens corresponde à manipulação de dados digitais, com ajuda de programas computacionais a partir dos quais se extraem e destacam informações específicas de interesse. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), de que é exemplo o *QGIS*, podem ser definidos como um conjunto de programas, metodologias, dados e pessoas (utilizadores),

integrados de forma a possibilitar a recolha, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados (TEI, 1995 citado em Alves, 2020).

No presente trabalho foram utilizados, sempre que possível, programas de código aberto para efetuar o processamento e modelação de dados (*QGIS*, *GIMP*). Foi ainda utilizado o programa *Agisoft Metashape Professional Edition* que é baseado na aplicação da fotogrametria digital, combinada com métodos de visão computacional, resultando assim num sistema de processamento automatizado, inteligente e eficiente (Agisoft LLC, 2022).

A utilização destes programas e a aplicação da metodologia proposta, pretende contribuir para uma redução de custos numa fase de estudo prévio (prospecção), numa caracterização inicial da área, permitindo definir as melhores estratégias de otimização do plano de exploração, levando à redução de desperdícios e a um maior aproveitamento dos recursos ou numa fase de exploração, quando se pretende definir o rumo ou sentido da exploração (Duarte, 2018).

Com o presente trabalho, pretende-se conjugar as tecnologias referidas e encontrar uma metodologia eficaz, barata e de fácil aplicação, que possa ser utilizada na prospecção de rocha ornamental e caracterização dos maciços rochosos, fornecendo resultados estatisticamente confiáveis diante do conjunto de dados a que o técnico tem acesso (Filho, 2019) e que garanta à empresa uma vantagem competitiva, melhorando a relação investimento / benefício, na indústria extrativa portuguesa (Duarte, 2018).

O estudo desenvolvido recorre a técnicas de deteção remota e geoprocessamento que são ferramentas úteis e indispensáveis para o mapeamento do terreno, uma vez que proporcionam maior agilidade no processamento, maior frequência na atualização de dados aumentando a viabilidade económica (Vaeza *et al.*, 2010).

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é contribuir com uma metodologia de aplicação de tecnologias que integre dados de prospecção geológica de campo e deteção remota, que consiga levar a uma distinção de características dos tipos litológicos aflorantes, que indiquem locais com aptidão para extração de rocha ornamental, tendo por base de comparação outros trabalhos já realizados na área de estudo, nomeadamente no Valinho de Fátima, mais especificamente entre as localidades de Currais e Boleiros (Duarte, 2010, 2018).

O principal objetivo da dissertação passa pela aplicação do método fotogramétrico em zonas de pedra e posterior classificação do material que nesta existe, com base nas características da rocha captadas nas fotografias obtidas com recurso a VANT e com a aplicação da classificação automática, de maneira a validar a cartografia geológica à escala local da área em estudo, que levem à otimização do processo de exploração.

Com a realização deste estudo, pretende-se promover a utilização de novas tecnologias inovadoras que levem à identificação de materiais geológicos através de técnicas de deteção remota, permitindo a obtenção de informação em zonas de difícil acesso, que noutras circunstâncias não seriam acessíveis.

Para além dos objetivos já enumerados, pretendeu-se verificar a eficácia do programa informático de SIG na distinção entre rochas do mesmo tipo litológico, no caso em estudo rocha calcária, onde as principais diferenças são a nível da textura, granulometria e tonalidade.

1.3 Metodologia

O presente trabalho foi efetuado num local geologicamente conhecido, nomeadamente nas pedreiras Eduardo Marques e Rosa (EM&R) nº 6478 e Lagoa nº 6720, ambas no Valinho de Fátima, Fátima.

Para a classificação da área em estudo, procedeu-se numa primeira fase, à realização de vários modelos fotogramétricos a partir das fotografias coletadas com um VANT, em dias e horas diferentes, e sob diferentes condições atmosféricas, de maneira a observar quais as alterações provocadas no modelo final, com o programa informático *Agisoft Metashape Professional Edition*.

Uma vez efetuada a análise dos resultados desta fase, foi possível identificar as principais variáveis que condicionam a aquisição de dados e o processo de classificação dos materiais litológicos.

Após a realização dos modelos fotogramétricos, seguiu-se o mapeamento das unidades, recorrendo para isso à classificação automática assistida (*Semi Automatic Classification*) que permite um rápido mapeamento temático superficial, em ambiente *QGIS* (Sekerketin *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2018), a partir das assinaturas espectrais da superfície das unidades litológicas (radiação refletida em função do comprimento de onda), tendo em conta o desenvolvimento horizontal e vertical destas unidades.

Paralelamente foram efetuadas análises com espectrofotómetro portátil em amostras de mão recolhidas nos diferentes tipos de calcários aflorantes no local em estudo. Este equipamento possui condições de iluminante padrão, que se assemelha à luz solar, e pretendeu-se verificar se existe ou não, algum tipo de relação entre as medições de refletância obtidas em laboratório com as amostras em afloramento, e com os mapas geológicos gerados em SIG através dos dados fornecidos pela aerofotogrametria, cuja fonte de luz principal é o sol.

É necessário ter sempre em conta que os resultados obtidos por ML apresentam um grau de ambiguidade e incerteza. Desta maneira, numa fase seguinte a este conjunto de processos é conveniente a aplicação de outros meios de prospeção, para verificação dos resultados obtidos, sendo as sondagens mecânicas com recuperação de testemunho, o mais utilizado (Duarte, 2010).

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos principais.

No **capítulo 1 – Considerações iniciais** é realizada uma introdução à dissertação, bem como uma descrição dos objetivos principais, da metodologia e uma apresentação da estruturação adotada no presente documento.

O **capítulo 2 – Princípios teóricos e considerações experimentais** remete para uma introdução teórica aos fundamentos de prospeção geológica, deteção remota, fotogrametria e colorimetria, bem como as condições experimentais de equipamentos.

No **capítulo 3 - Caraterização da área de estudo** descreve o enquadramento geográfico, geológico e geomorfológico da área de estudo, baseado em bibliografia.

O **capítulo 4 – Métodos e metodologias** expõe e descreve os métodos e metodologias utilizados no decorrer da dissertação, com destaque para o método da fotogrametria.

No **capítulo 5 – Análise e discussão de resultados** são apresentados, analisados e posteriormente discutidos os resultados obtidos.

O **capítulo 6 – Considerações finais** remete para as conclusões que foi possível obter, para as dificuldades encontradas na realização da presente dissertação, e possíveis trabalhos futuros.

Por último, são apresentadas as referências bibliográficas e anexos com a informação utilizada no decorrer da elaboração desta dissertação.

Capítulo 2 – Princípios teóricos e considerações experimentais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário perceber informações relativas a diversas áreas do conhecimento, que aqui se apresentam para facilitar o enquadramento global.

Quando se pretende efetuar a escolha dos locais de implantação de pedreiras, pode recorrer-se a diversos métodos de prospeção e pesquisa geológica, com o objetivo de determinar a natureza e características do terreno. Depois de efetuada a pesquisa bibliográfica e a recolha das informações geológicas da área, existem vários métodos de investigação/prospeção que auxiliam na tomada da decisão: os métodos de prospeção indireta (não destrutivo), nos quais as propriedades do subsolo são estimadas indiretamente por medição de grandezas relacionadas, como é o caso dos métodos geofísicos e geoquímicos, e os métodos diretos, que são normalmente mais dispendiosos, mas que permitem a observação direta do subsolo, ou através de amostras de perfuração ou *in situ*, como é o caso das sondagens, poços, valas e trincheiras.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias recorrendo à utilização de técnicas pouco invasivas, o objetivo atual é conseguir determinar as características geológicas dos maciços que indiquem zonas com as características procuradas no mercado.

No caso da extração de rocha ornamental, devido à qualidade exigida na extração de blocos, torna-se ainda mais imprescindível contar com uma metodologia de prospeção eficaz, mas sem grandes custos associados, tanto numa fase de estudo prévio, onde são definidas as estratégias mais adequadas para investir, como numa fase de exploração, onde a metodologia fornece um contributo para a otimização de processos, que se traduz num melhor aproveitamento de recursos (Duarte, 2018).

2.1 Deteção Remota

A definição de Deteção Remota (DR), atribuída por Lillesand e Kiefer (2000, citado por Bishop *et al.*, 2018), corresponde à “ciência e a arte de obter informações sobre um objeto, área, ou fenómeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo que não esteja em contacto com o objeto, área ou fenómeno sob investigação”.

Contudo, para o bom funcionamento desta técnica, é importante que estejam presentes várias componentes, nomeadamente: uma fonte de energia (normalmente a luz solar), uma componente de observação (p. ex. a superfície terrestre ou outro), um sensor com a capacidade de captar e analisar a informação registada (câmara fotográfica ou outro), uma plataforma ou mecanismo que transporta o sensor, um mecanismo de processamento da informação e, por fim, um operador humano que faça a análise necessária aos dados recolhidos. (Gonçalves, 2005).

Assim, é possível afirmar que a ciência de Deteção Remota aplicada à geologia, pode ser considerada o estudo da Terra, as suas características geológicas, e a sua interação com o espectro eletromagnético utilizando tecnologia que não se encontra em contacto direto com o objeto (Bishop *et al.*, 2018). As aplicações geológicas da DR incluem, entre outras, cartografia litológica, cartografia estrutural e exploração de minerais e de petróleo.

2.1.1 Radiação Eletromagnética

As técnicas de Detecção Remota como meio de aquisição de dados de um determinado objeto são possíveis devido à condição natural, deste refletir a radiação eletromagnética de origem solar. Para a tecnologia de detecção remota, é útil apenas uma porção reduzida do espectro eletromagnético, que se distribui em três faixas espectrais descontínuas, situadas entre 400 nm e 100cm (do visível até às micro-ondas), devido às atenuações e absorções de Radiação Eletromagnética (REM) provocadas pelos gases atmosféricos e devido ao fato de as únicas fontes naturais de REM serem o Sol e a Terra (Meneses & Almeida, 2019a).

Um dos meios mais utilizados para fazer a medição da REM na faixa de luz solar e usada em DR, é através de sensores presentes nas plataformas orbitais (satélites), contudo o leque de opções tem vindo a aumentar e existem vários sensores óticos, que podem ser acoplados em sistemas aéreos, capazes de capturar remotamente imagens que permitem a análise de características diversas da mesma área geográfica, como é o caso das câmaras digitais e dos sensores multi e hiperspectrais transportáveis em aviões, ou em veículos aéreos não tripulados (VANT's) que possuem um peso reduzido e um elevado desempenho.

A Radiação Eletromagnética é constituída por um campo elétrico e um campo magnético, perpendiculares entre si. A propagação desta energia é feita através de ondas eletromagnéticas, que se propagam no vácuo a uma velocidade constante, com uma relação entre a frequência e o comprimento de onda inversamente proporcionais.

Normalmente os sensores remotos de alta resolução espacial possuem capacidade de detetar objetos com uma dimensão reduzida na superfície terrestre, criando um elevado volume de dados a ser transmitido à terra (caso se trate de um satélite). Para limitar essa variável, os valores registados encontram-se geralmente limitados a comprimentos de onda mais curtos, por exemplo de 400 nm-2500 nm que corresponde à REM ótica, se a fonte de radiação for a luz solar (Meneses & Almeida, 2019a).

O sinal registado pelos sensores corresponde à intensidade da radiação eletromagnética solar refletida pela superfície dos materiais superficiais (Tabela 1) sendo a REM ótica ou o “espectro ótico” correspondente às regiões do espectro visível (Figura 1), infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Meneses & Almeida, 2012a). Assim, esta é a região espectral mais utilizada por grande parte dos sensores multi e hiperspectrais, bem como pela espectrofotometria (Meneses & Almeida, 2019a).

Tabela 1. Intervalos espectrais usados em Detecção Remota (Adaptado de Meneses & Almeida, 2019a).

Denominação	Intervalo espectral ($\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$)	Fonte de radiação	Propriedades da medida
Visível	400 - 700 nm	Sol	Refletância
Infravermelho próximo	700 - 910 nm	Sol	Refletância
Infravermelho de ondas curtas	1.190 - 1.340 nm 1.550 - 2.500 nm	Sol	Refletância
Infravermelho médio	3,5 - 4,2 μm 4,5 - 5,0 μm	Corpos terrestres com altas temperaturas , como incêndios em florestas ou vulcões ativos	Emitância
Infravermelho termal	8,0 - 9,2 μm 10,2 - 14 μm	Terra	Emitância
Micro-ondas (radar)	3,2 - 100 cm	Artificial	Refletância retroespelhada

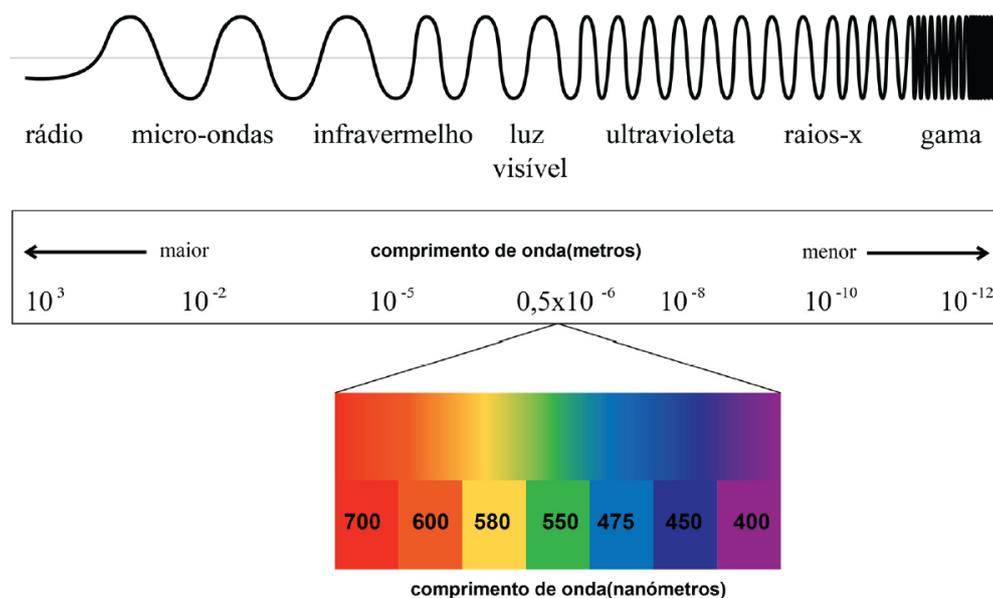


Figura 1: Divisão do espectro eletromagnético com ênfase na região do visível (Adaptado de Pereira, 2019)¹

As diversas interações de absorção, reflexão e transmissão da REM com os objetos ou materiais torna possível a distinção entre materiais na superfície terrestre (Fonseca & Fernandes, 2004 citado em Pereira, 2019), por corresponderem a valores diferenciados de refletância (reflexão), absorvância (absorção) e transmitância (transmissão) por comprimento de onda (Meneses & Almeida, 2019a), sendo a soma destas três componentes igual à intensidade da energia radiante incidente que pode também ser afetada pelo ângulo de incidência da REM, pelo tipo de matéria que o constitui e pelas suas características físicas. (Pereira, 2019).

Quando se trata de materiais sólidos como o caso das rochas, a transmitância pode ser considerada igual a zero (0), e, uma vez que o sensor não está em contato físico direto com o objeto em estudo, também não registrará diretamente a absorvância, pelo que a quantidade de energia retida no objeto e quantificada pelos sensores será a componente de refletância da REM (Meneses & Almeida, 2019a).

O fato de a radiação solar e da reflexão provocada pelos objetos que interagem na superfície terrestre atravessar a atmosfera antes de atingir o sensor do satélite, provoca alguma interferência devido às difusões e absorções de energia que ocorrem na atmosfera, o que leva a que muitas vezes tenha de ser efetuado um processamento digital posterior, para corrigir essas distorções. Se a posição do sensor for mais próxima da superfície terrestre a interferência atmosférica pode ser bastante mais reduzida (ESA, 2010).

¹Existem vários autores que têm em consideração diferentes limites para o intervalo de comprimento de onda do espectro visível, tal como, Meneses & Almeida (2019a), que considera o intervalo de 450 a 760 nm, Batista, (2015), que considera que a faixa visível está contida entre 370 nm e 750 nm, e neste caso consideramos o intervalo definido por Pereira (2019), que varia entre 400 e 700 nm.

2.1.2 Refletância

A espectrofotometria em DR, está relacionada com a medição da REM em quantidade ou intensidade, em diferentes faixas ou intervalos do espectro eletromagnético. Esta técnica encontra-se associada aos instrumentos radiométricos de campo ou laboratório, que quantificam os valores de refletância versus comprimento de onda, denominados por curvas espectrais (Meneses & Almeida, 2019a). Estas são dependentes de várias características físicas da superfície, do ângulo de vista do sensor, do azimute e da sua elevação, bem como o ângulo de incidência da REM na superfície terrestre (Pereira, 2019). Desta maneira, utilizando o mesmo ângulo de incidência, e restantes condições do sensor, diferentes materiais irão apresentar diferentes curvas espectrais.

A refletância é a razão entre as intensidades das energias incidente e refletida sendo um parâmetro essencial na interpretação de imagens através de sensores remotos, e isso torna-se evidente com a constatação de que, grande parte das técnicas de processamento de imagens digitais que procuram evidenciar ou classificar algo, baseia-se na análise espectral e não nos atributos espaciais relacionados com a forma dos objetos ou dos alvos (Meneses & Almeida, 2019b).

A refletância de um determinado objeto numa determinada faixa do espectro, é uma propriedade inerente ao objeto, visto que não depende da intensidade da iluminação, e por isso pode ser utilizada para definir a assinatura espectral do alvo (Almeida & Ferreira, s.d.).

A medida da refletância é fundamental na análise da interação entre a REM e a superfície terrestre porque grande parte dos sistemas utilizados em DR são passivos (por exemplo os sensores ótico-eletrónicos), ou seja, os detetores não possuem uma fonte de energia própria e por isso precisam de uma fonte de energia externa ao sistema para funcionar, registando nos seus sensores a REM refletida na superfície terrestre. A porção de REM refletida entra no campo de visão do sensor, sendo detetada e posteriormente convertida num valor numérico (Pereira, 2019).

Assim, a representação gráfica das variações de refletância dos materiais nos diferentes comprimentos de onda compõem as suas assinaturas espectrais e, a partir da análise de feições específicas nas assinaturas, os materiais podem ser identificados (Naleto, 2018).

Relativamente à refletância nas rochas, é importante ter em consideração que o comportamento espectral varia consoante o tipo de rocha. Desta maneira, o comportamento de refletância de uma rocha é ditado pela sua composição mineral e textura, propriedades que também têm uma grande influência na cor da rocha (Meneses & Almeida, 2019b).

2.2. Fotogrametria

A partir de 1979, a *American Society of Photogrammetry*, passou a definir a fotogrametria como a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação fiável sobre uma determinada área ou objeto físico, através de processos de medição, aquisição e interpretação de imagens fotográficas (aéreas ou terrestres). Por outras palavras, a fotogrametria corresponde ao processo de captação de fotografias de um determinado objeto ou local, que permite a criação do respetivo modelo em 2 ou 3 dimensões (2D e 3D). A fotogrametria analítica e digital são as mais aplicadas atualmente, visto que deixou de fazer sentido utilizar a fotogrametria analógica, com o avanço dos sistemas computacionais.

A fotogrametria providencia informação fiável dos objetos fotografados, e pode ser dividida em fotogrametria quantitativa (métrica ou geométrica), que envolve a determinação da posição de pontos no terreno, medição de áreas, volumes, entre outros, e a fotogrametria qualitativa (fotointerpretação), que consiste na obtenção de dados qualitativos a partir da análise das fotografias ou imagens de satélite (Tommaselli, 2009) ou obtidas por outros meios.

A fotogrametria métrica é normalmente dividida em fotogrametria terrestre e fotogrametria aérea (aerofotogrametria). Assim a aerofotogrametria refere-se à aplicação do método fotogramétrico quando as fotografias do terreno são tiradas por uma câmara de precisão acoplada numa aeronave, enquanto a fotogrametria terrestre, é utilizada quando as fotografias são tiradas de uma posição fixa no terreno (normalmente conhecida) (Tommaselli, 2009).

A fotogrametria utiliza, a deteção remota para obter imagens de um determinado alvo ou objeto, utilizando para isso o conjunto de imagens bidimensionais e a análise estereoscópica, permitindo a construção de modelos digitais em espaço tridimensional.

Com a automatização do processo fotogramétrico e com o objetivo de tornar os levantamentos tridimensionais mais rápidos, baratos e simples, foi desenvolvida a abordagem “*Structure from motion*” (SFM) que é um método de restituição da superfície baseado em fotografias (Lopes, 2015) adquiridas de várias perspetivas (posições diferentes), a partir das quais, conhecendo a posição, orientação e distancia focal (Tavani *et al.*, 2014 citado em Melo Júnior *et al.*, 2018), permite uma correspondência de pontos bidimensionais (pontos homólogos ou *tie points*), para a construção da geometria tridimensional de um objeto ou área (Verhoeven., 2011). Um *tie point* é um ponto que possui uma matriz de cor, *Red, Green e Blue* (RGB), que vai ser correlacionada e identificada (aproximadamente) noutra imagem digital adjacente, através do programa de processamento, podendo ser ligadas imagens e criados mosaicos (Duarte, 2010).

A aplicação do método fotogramétrico é possível se um determinado ponto físico presente à superfície em várias imagens (em pelo menos 2 imagens) permitir determinar a sua localização na nuvem de pontos e efetuar a sua correspondência, o que obriga a um elevado grau de sobreposição (longitudinal e lateral) das fotografias (Lopes, 2015).

De maneira a conseguir aplicar a metodologia proposta no trabalho em estudo, foi necessário recorrer à utilização do programa *Agisoft Metashape*, que permite, a partir do processamento fotogramétrico de imagens (fotografias aéreas, de curto alcance ou imagens de satélite), gerar dados espaciais 2D e 3D. A utilização deste programa informático pode ter diversas finalidades, como a criação de Modelos Digital de Elevação (MDE), ortofotomapas, entre outros, para serem posteriormente utilizados em aplicações SIG, entre outras finalidades (Agisoft LLC, 2022). Este programa é considerado bastante versátil, uma vez que pode ser manuseado tanto por um especialista na área, como por um indivíduo com poucos conhecimentos na área da fotogrametria e porque permite o processamento de imagens de vários tipos de câmaras, tais como: RGB, térmicas ou multiespectrais, incluindo sistemas multi-câmaras (Agisoft LLC, 2022), sendo a Universidade de Coimbra detentora da respetiva licença de utilização.

2.3 Processamento e classificação de imagens digitais

O geoprocessamento é um termo amplo que aborda um conjunto de tecnologias destinadas à coleta, tratamento e processamento informatizado de dados geográficos com o auxílio de programas computacionais, como mostra a Figura 2.

O processamento digital de imagens é utilizado na fotogrametria com o intuito de melhorar a qualidade de visualização, corrigindo distorções existentes e abrange técnicas como: o pré-processamento, o realce e a classificação (Lillesand *et al.*, 1994 citado em Alves, 2020). Desta maneira, o pré-processamento implica retificação das distorções da imagem originadas durante o processo de aquisição de dados (como é o caso da correção geométrica e radiométrica das imagens, correção dos efeitos atmosféricos e eliminação de ruído de fundo). Esta fase de pré-processamento é mais relevante quando se trata da manipulação de imagens orbitais (de satélite), visto que no caso de utilização de imagens digitais obtidas com VANT, as correções devido à altitude de captura diminuem este tipo de erros. No caso do realce, este visa melhorar a qualidade visual das imagens (manipulação de contraste, filtros etc.), e por fim o procedimento de classificação, corresponde à obtenção do mapeamento, ou ao reconhecimento de características da superfície terrestre, atribuindo conjuntos de pontos ou *píxeis* de uma imagem a determinadas classes, por meio de um processo de decisão (Alves, 2020).

Assim, é no procedimento de classificação que se efetua o treino do programa computacional para reconhecimento das classes de interesse no trabalho a desenvolver.

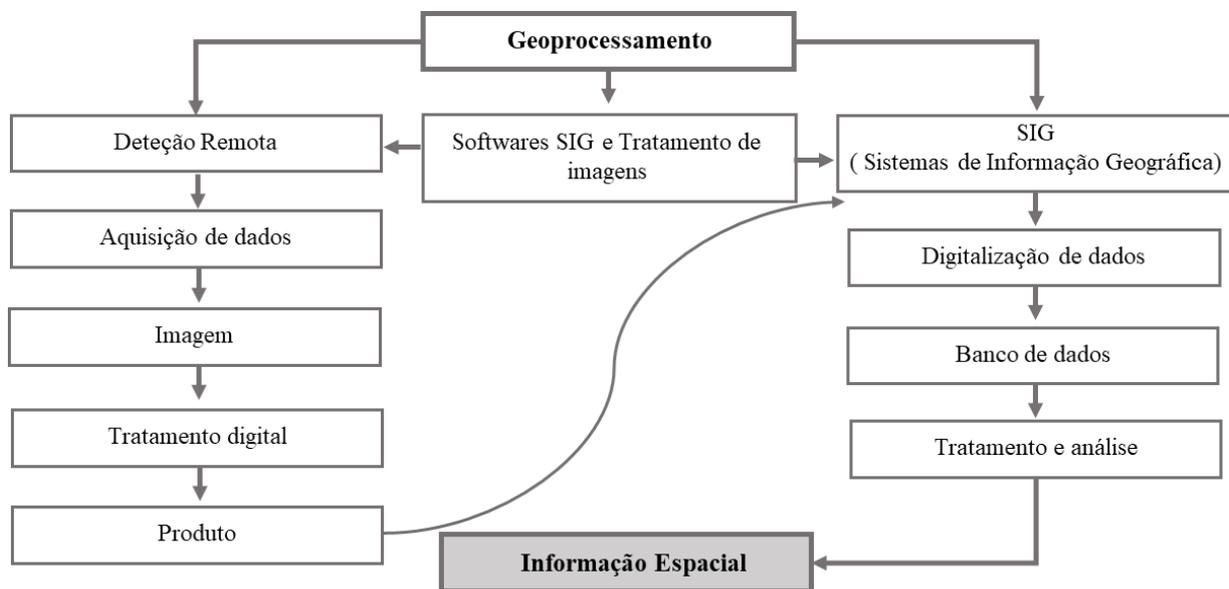


Figura 2: Diagrama com as tecnologias que englobam o geoprocessamento (Fonte: Lima & Souza, 2018).

As técnicas de classificação mais utilizadas subdividem-se em supervisionada e não-supervisionada.

Na classificação não-supervisionada, o utilizador recorre a um algoritmo computacional que permite fazer o reconhecimento das classes presentes na imagem, ou seja, localizar os agrupamentos de *píxeis* a partir de amostras heterogéneas. O algoritmo utilizado na classificação não-supervisionada, é denominado de *clustering* ou algoritmo de agrupamento, sendo os algoritmos mais utilizados: *K-means* e ISODATA, entre outros (Alves, 2020).

Na classificação supervisionada (também conhecida como classificação semi-automática), o utilizador identifica na imagem alguns dos *píxeis* pertencentes às classes desejadas, formando a fase de treino, definida pelo mesmo, a partir daí o sistema estimará vários parâmetros como vetor de médias etc, para descrever as classes e o programa informático escolhido localizará todos os demais *píxeis* pertencentes àquelas classes, baseando-se para isso numa regra estatística pré-estabelecida (Crósta, 1992). A partir desses *píxeis* são extraídas determinadas características das várias classes, que apresentam comportamentos espectrais diferentes.

A classificação supervisionada normalmente possui uma maior precisão relativamente à não supervisionada, visto que é obtida a partir dos dados de campo com base no conhecimento prévio das áreas e dos tipos de ocupação do solo que se pretendem classificar (Oliveira *et al.*, 2014). Desta maneira, a imagem é classificada nas classes de interesse pré-definidas, onde o algoritmo é treinado para as poder distinguir (Meneses & Sano, 2012).

Os algoritmos de classificação supervisionada adotados para extrair feições de interesse mais utilizados são: Distância Mínima, Máxima Verossimilhança e Método *Spectral Angle Mapper* (Vale *et al.*, 2018).

O método de classificação supervisionada, envolve três fases, nomeadamente:

- Treino, a fase na qual são identificadas as áreas de treino, ou sejam áreas que representam o comportamento médio das classes que deverão ser mapeadas automaticamente, e a partir das quais se faz uma descrição dos atributos espectrais de cada tipo de cobertura de interesse na cena (Novo, 2010).
- Classificação: o *pixel* é classificado em função das suas características se assemelharem ou não a alguma classe. Caso contrário, ele é classificado “desconhecido” ou “*unclassified*”.
- Resultado: o resultado da classificação digital é apresentado em mapa com várias cores representando as diferentes classes espectrais (áreas que possuem características espectrais semelhantes).

No final, é efetuada a validação dos dados gerados de modo a evitar interpretações erradas, e também para avaliar o desempenho da classificação da cobertura do terreno (Queiroz *et al.*, 2017). Para a verificação da precisão dos dados geográficos, são normalmente considerados 3 pontos: a posição dos dados (erro posicional), a época de aquisição dos dados (erro temporal) e a temática investigada (erro temático) (Lobão *et al.*, 2005 citado em Queiroz *et al.*, 2017).

Segundo Campbell (1996, citado em Máximo & Fernandes 2005), o processo de classificação supervisionada de imagens apresenta vantagens e desvantagens. A principal vantagem desta técnica é que o analista possui maior controlo sobre o processo de classificação (pode escolher o número e tipo de classes, regiões de amostragem etc.) e para além disso, permite ao utilizador identificar possíveis imprecisões ocorridas, pela análise das áreas de treino. As principais

desvantagens, é que o utilizador pode predefinir um conjunto de classes de informação, impondo uma determinada estrutura de classificação aos dados que podem não corresponder às classes reais existentes no espaço n-dimensional. Para além disso, a área de treino selecionada pode não ser bem escolhida e apresentar muitas das características representativas das várias classes, o que pode causar problemas em áreas grandes e complexas.

Para além da utilização do *Agisoft Metashape Professional Edition* na realização do processamento fotogramétrico das imagens, foi necessário recorrer a programas informáticos para realizar o processamento digital das imagens, nomeadamente o *QGIS* e o *GIMP*. O *QGIS* é um *software* de Sistema de Informações Geográficas (SIG), gratuito e de código aberto que oferece suporte à visualização, edição, classificação e análise de dados geoespaciais (*QGIS*, 2022). A versão do programa utilizada foi a versão 3.22.6 com a utilização da ferramenta *Semi-Automatic Classification Plugin* versão 7.10.6.

O *Semi-Automatic Classification Plugin* ou *Plugin* de Classificação Semi-Automática (SCP) é um complemento desenvolvido para o programa *QGIS* que possibilita a classificação *pixel a pixel* de imagens capturadas por diversos sensores, como os satélites ou por câmaras em VANT's. Esta técnica de processamento de imagens pretende obter a classificação da cobertura do terreno, através da definição de um algoritmo de treino, a partir das diferentes assinaturas espectrais dos materiais (Congedo, 2021).

O *Agisoft Metashape* e o *QGIS* necessitam de um fluxo de trabalho lógico de forma a fornecerem resultados considerados fiáveis, e o não cumprimento de um dos passos pode gerar erros no modelo (Coelho, 2019).

O *GNU Image Manipulation Program (GIMP)* é um programa de edição de imagem de código aberto (freeware) com a finalidade de edição de fotografia digital. A versão utilizada foi 2.10.4. mas a sua utilização foi reduzida.

2.4 Colorimetria

A colorimetria é uma técnica de medida da reflexão da energia radiante (geralmente a luz) sobre um objeto. Esta técnica baseia-se na comparação direta ou indireta da intensidade da cor. A utilização do espectrofotómetro permite uma caracterização básica, simples e relativamente pouco dispendiosa, em que os resultados têm boa sensibilidade e precisão. Nestes instrumentos de medição pode ser utilizada uma fonte de luz artificial ou uma célula fotoelétrica, que simulará a luz solar (Santos, 2010).

O ser humano só consegue ver uma pequena faixa do espectro de frequências do espectro eletromagnético, designado de faixa visível, contida entre 400 nm (violeta) e 700 nm (vermelho) do espectro eletromagnético. Contudo, em termos computacionais, é possível representar esta sensação de cor através de diversos sistemas de cor digitais:

- RGB representação das cores vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*);
- HSV representação da tonalidade (*Hue*), saturação (*Chroma/Saturation*) e brilho das cores (*Value/Lightness*);

- CMYK representação das cores ciano (*Cyan*), magenta (*Magenta*), amarelo (*Yellow*) e preto (*black*);

- CIE $L^*a^*b^*$ ou CIELAB definido pela *Commission Internationale de l'Eclairage* que representa a relação espaço cor de forma tridimensional recorrendo a 3 eixos ortogonais entre os seguintes valores: branco ($L^*=0$) - preto ($L^*=100$); verde ($-a^*$) – vermelho ($+a^*$) e azul ($-b^*$) – amarelo ($+b^*$).

Ao contrário dos modelos de cor RGB e CMYK, o modelo de cor CIE possui um espaço de cor fixo e completamente independente de qualquer dispositivo ou meio de emissão e reprodução, baseando-se na perceção das cores pelo sistema visual humano (Lopes, 2009).

2.5 Características de equipamentos

2.5.1 Veículo aéreo não tripulado

A legislação em Portugal da responsabilidade da Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC), define um veículo aéreo não tripulado (VANT), também vulgarmente designado por “drone”, como um “veículo aéreo (ou aeronave) que se destina a operar sem piloto a bordo, a qual tem capacidade para operar autonomamente ou ser pilotada remotamente.” (Regulamento n.º 1093/2016).

Os VANT's destacam-se de outros equipamentos de obtenção de fotografias, por permitirem adquirir imagens com alta qualidade e resolução em áreas de difícil acesso e com topografia muito variável. Para além disso, incorpora a transmissão de sinal por satélite recebido por *Global Positioning System* (GPS) no eixo de coordenadas da câmara melhorando a qualidade da informação geométrica da imagem (Westoby *et al.*, 2012).

Para além da sua alta mobilidade e do seu peso reduzido, os VANT's possuem outras vantagens associadas, tais como a velocidade, a possibilidade de obtenção de fotografias de diferentes perspetivas, e também o reduzido custo que lhes está associado (Reich *et al.*, 2012 citado em Figueiredo, 2019).

Nos VANT's a diferença entre a altura de recolha da imagem e a altura do voo realizado origina distorções de perspetiva devido à sua menor estabilidade, o que significa que os critérios de estimativa automática da orientação interna e externa das imagens, apresentam falta de exatidão e precisão. Nas plataformas tradicionais aéreas (satélites), tal não se verifica uma vez que nas câmaras e recetores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de alta qualidade nem o espaço, nem o peso do material interferem no resultado (Küng *et al.*, 2011 citado em Duarte & Gonçalves, 2015). Devido à maior incerteza na determinação das posições da câmara e no processo de obtenção automática de pontos de ligação, é necessário que a sobreposição das imagens obtidas pelos VANT's seja maior do que a utilizada nas imagens de satélite (Duarte & Gonçalves, 2015).

O VANT pode ser operado autonomamente ou pilotado remotamente. No primeiro caso, é necessário pré-definir uma série de parâmetros que condicionarão o voo e consequentemente a qualidade dos resultados obtidos, que são:

- *Ground Sampling Distance* (GSD) ou Distância de Amostragem de Solo, ou seja, a representação do *pixel* da imagem em unidades de terreno ou a distância entre os centros dos *pixels* no solo, a partir da qual é definido o tamanho do *pixel* (figura 3);
- Altitude de voo;
- A sobreposição longitudinal (aproximadamente 80%) e transversal (aproximadamente 60%) das fotografias (Duarte, 2018), sendo que a percentagem de sobreposição utilizada depende da finalidade do estudo;
- A velocidade de disparo da câmara em relação à velocidade do voo;
- A separação entre as fiadas;
- A distância focal da câmara;
- O ISO (Intervalo de sensibilidade fotográfica);
- A resolução espacial.

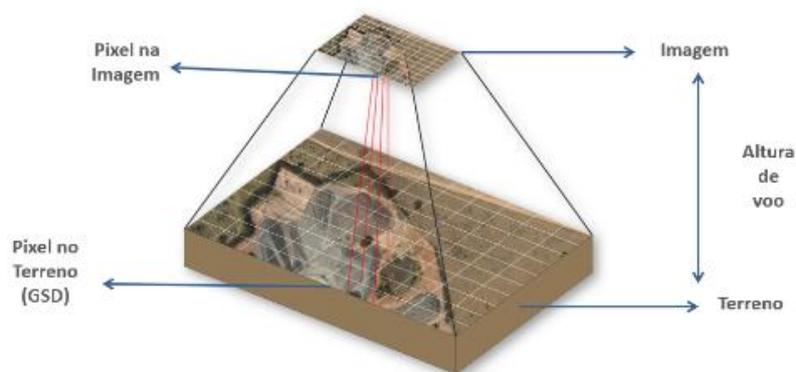


Figura 3: Relação entre a imagem/*pixel* e o terreno /GSD (Fonte: DroneEng, 2015)

A resolução espacial é um parâmetro que é afetado pelos outros anteriormente mencionados, e depende muito da finalidade do trabalho em estudo, e da qualidade pretendida no mesmo.

O GSD é normalmente uma das primeiras variáveis a ser definida visto que garante a resolução espacial do mapeamento, ou seja, o seu nível de detalhe. Este parâmetro encontra-se diretamente relacionado com a altura de voo, com a distância focal da câmara e com o tamanho do *pixel*. Assim, o tamanho do GSD é inversamente proporcional ao nível de detalhamento e diretamente proporcional à capacidade de mapeamento, ou seja, quanto maior o GSD, menor o detalhe, e maior a área de mapeamento (Neto, 2016).

No processo de captura de fotografias, é importante que o voo seja sempre realizado à mesma altitude em relação ao nível médio do mar, de maneira a garantir uma distância focal fixa, para todas as fotografias possuírem a mesma escala e não induzir o programa em erro. No caso dos VANT's, este fato pode, por vezes, ser difícil de controlar se não houver a presença de instrumentos de estabilização da câmara (DroneEng, 2017a).

Para a execução de mapas topográficos ou de ortofotomapas utilizam-se normalmente as imagens adquiridas com uma visada próxima da vertical, ou seja, em que o eixo da câmara é colocado verticalmente (Fonte, 2008).

Para além dos parâmetros mencionados, outro fator que deve ser considerado são as condições atmosféricas, sendo que a este parâmetro estão inerentes diferentes aspetos, como a inclinação do sol na altura do levantamento ou a previsão de nuvens nesse dia. A altura do ano em que é realizado o levantamento fotográfico também condicionará o resultado, por exemplo se o voo for realizado numa altura do ano em que as copas das árvores estão densas, podem condicionar a visibilidade de grandes áreas (Lino, 2018).

2.5.2 Resolução do Sensor

A resolução de um sensor determina a capacidade de obter informação detalhada de uma área. Podem distinguir-se quatro tipos de resolução nos sensores: espacial, espectral, radiométrica e temporal. Para isso é importante ter em consideração que o *pixel* é a menor unidade que compõe uma imagem digital e que o *bit* é a menor unidade de informação que pode ser armazenada ou transmitida, na computação e informática.

A resolução espacial diz respeito à capacidade do sensor em diferenciar elementos na superfície terrestre. Esta capacidade do sistema baseia-se na projeção geométrica do detetor na superfície, definindo a área do campo de visada do instrumento numa determinada altitude e instante, definindo assim um ângulo, *Instantaneous Field of View* (IFVO) (Marino, s.d.). Quanto maior a resolução espacial da imagem, maior o nível de detalhe perceptível na imagem, e menor será a área real representada num *pixel*, resultando numa maior capacidade de identificar detalhes nessa mesma imagem.

A resolução radiométrica diz respeito ao nível de sensibilidade do sensor para detetar variações (da radiância espectral) na imagem. O valor da radiância de cada *pixel* é convertido, por codificação digital, num valor numérico (ND), que se expressa em *bits*. Esta resolução é dada pelo número de níveis de brilho utilizados para compor a imagem. Por exemplo uma imagem com resolução radiométrica de 8 *bits* significa $2^8 = 256$ níveis de brilho, numerados de 0 a 255. Quanto mais *bits*, maior a sensibilidade do sensor para identificar diferenças mínimas de intensidade de radiância, o que resultará numa maior resolução radiométrica (Filho, 2005).

A resolução temporal é o tempo de revisita do sensor, ou seja, o período que medeia entre uma observação e a observação subsequente da mesma área. Esta resolução está dependente das características orbitais da plataforma de suporte (altura, velocidade e inclinação) (Filho, 2005) e apresenta interesse nos estudos que impliquem a monitorização da superfície terrestre ou para verificar as diferenças entre duas fotografias aéreas do mesmo local, tiradas em períodos distintos.

A resolução espectral está relacionada com o número e largura de bandas espectrais que os sensores existentes nas plataformas (satélite ou VANT) conseguem discriminar e têm em conta vários parâmetros, tais como: a quantidade de faixas espectrais (bandas), e a amplitude dos intervalos de comprimento de onda detetado pelos sensores. Uma alta resolução espectral é obtida quando as bandas de um sensor, ou seja, os intervalos de comprimento de onda sejam estreitos e/ou quando se utiliza um maior número de bandas espectrais (Chuvieco, 1992 citado em Filho, 2005), o que

permitirá uma maior discriminação do alvo na cena, tornando as assinaturas espectrais mais rigorosas.

Atualmente, a maioria dos programas informáticos em função das características do sensor, oferece ao utilizador a opção de escolher imagens convertidas para refletância, ou seja, imagens com as correções atmosféricas e radiométricas aplicadas, nas quais o Número Digital (ND) corresponde ao valor de refletância do material, permitindo desta maneira extrair os espectros de refletância de um determinado *pixel* numa imagem, para posteriormente fazer a comparação com as curvas espectrais de campo ou laboratório. Contudo, existem vários fatores que podem dificultar o estabelecimento de correspondência direta entre estes, nomeadamente (Meneses & Almeida, 2019a):

- No caso dos satélites, a presença da atmosfera, impede a obtenção de dados contínuos ao longo da faixa de radiação solar, o que não se verifica em laboratório visto que não existem tantas interferências.

- Os sensores de captação de imagem com poucas bandas, ou seja, com pouca resolução espectral, limitam a análise comparativa de refletância com os dados espectralradiométricos.

- A radiação refletida dos materiais, por vezes, integra áreas relativamente grandes (baixa resolução espacial), o que pode resultar numa grande mistura espectral nos *pixels*.

- Devido à maioria das superfícies serem refletoras difusas (ou seja, a reflexão do raio incidente é efetuada em várias direções, e não somente numa), a intensidade da radiação refletida pode variar consoante o ângulo de visada do sensor e/ou da fonte de REM.

Para além dos fatores acima mencionados, existem outros que dependem da constituição e natureza dos materiais, tais como (Meneses & Almeida, 2019a):

- A magnitude da refletância de um material depende do tamanho dos seus constituintes (exemplo: o efeito da granulometria de uma rocha).

- Alguns constituintes secundários presentes nos materiais, podem tornar-se dominantes no comportamento da refletância e induzir em erro.

- A presença de substâncias opacas, como a matéria orgânica contida no solo ou nas rochas, reduz a refletância total.

- A quantidade de sombra no *pixel* proveniente de efeitos da topografia e do declive, entre outros, altera a refletância dos materiais.

- Devido às atenuações e à difusão da radiação pela atmosfera, podem existir certas características espectrais modificadas nas imagens.

Tendo em conta os princípios abordados e as considerações experimentais que foram necessárias para uma melhor realização do trabalho, seguiu-se a aplicação do caso prático.

Capítulo 3 – Caracterização da área de estudo

3.1 Enquadramento geográfico

A área-alvo do estudo situa-se na Região Centro de Portugal, no distrito de Santarém, concelho de Ourém, freguesia de Fátima, mais precisamente entre as localidades de Currais e Boleiros, aproximadamente a 3 km para Sudeste (SE) da cidade de Fátima.

O local em estudo corresponde a explorações a céu aberto de calcário para fins ornamentais, sendo que a principal pedreira é da empresa Eduardo Marques & Rosa (EM&R). Por questões de proximidade foi também englobado neste estudo, a pedreira adjacente a esta, nomeadamente da empresa Ovelheiro & Filhos Lda. (Lagoa nº 6720) (figura 4).

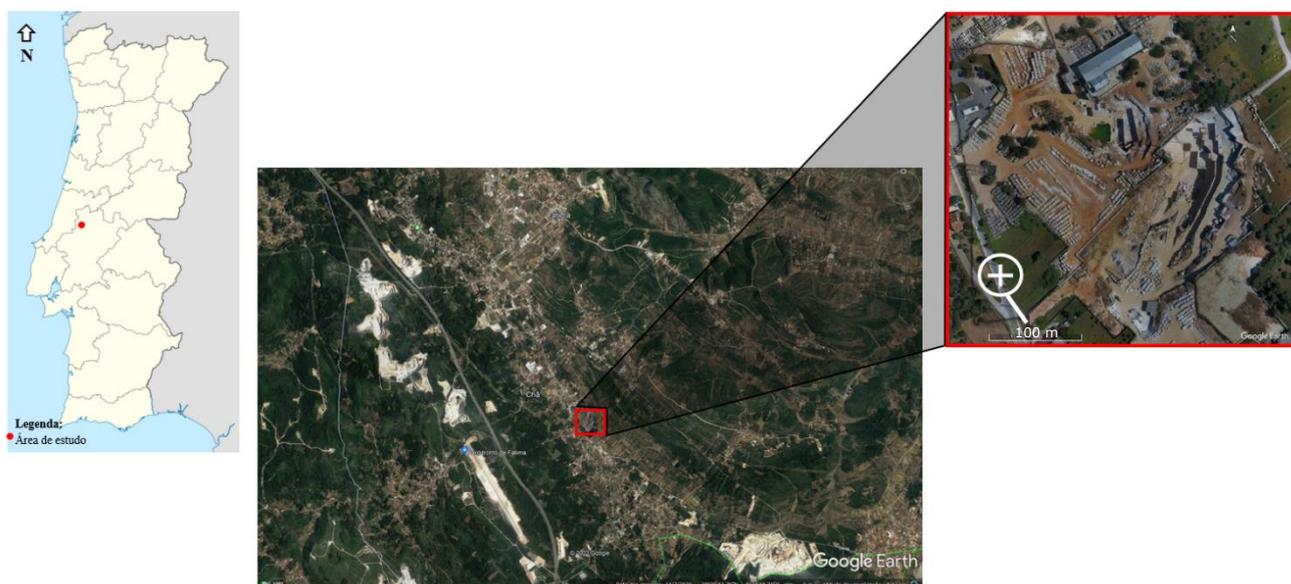


Figura 4: Localização da área de estudo no mapa de Portugal e em fotografia aérea obtida no Google Earth.

A área objeto de estudo está apresentada na Carta Militar de Portugal Série M888, Folha 309 - Vila Nova de Ourém à escala 1:50 000, elaborada pelo Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE) (figura 5).

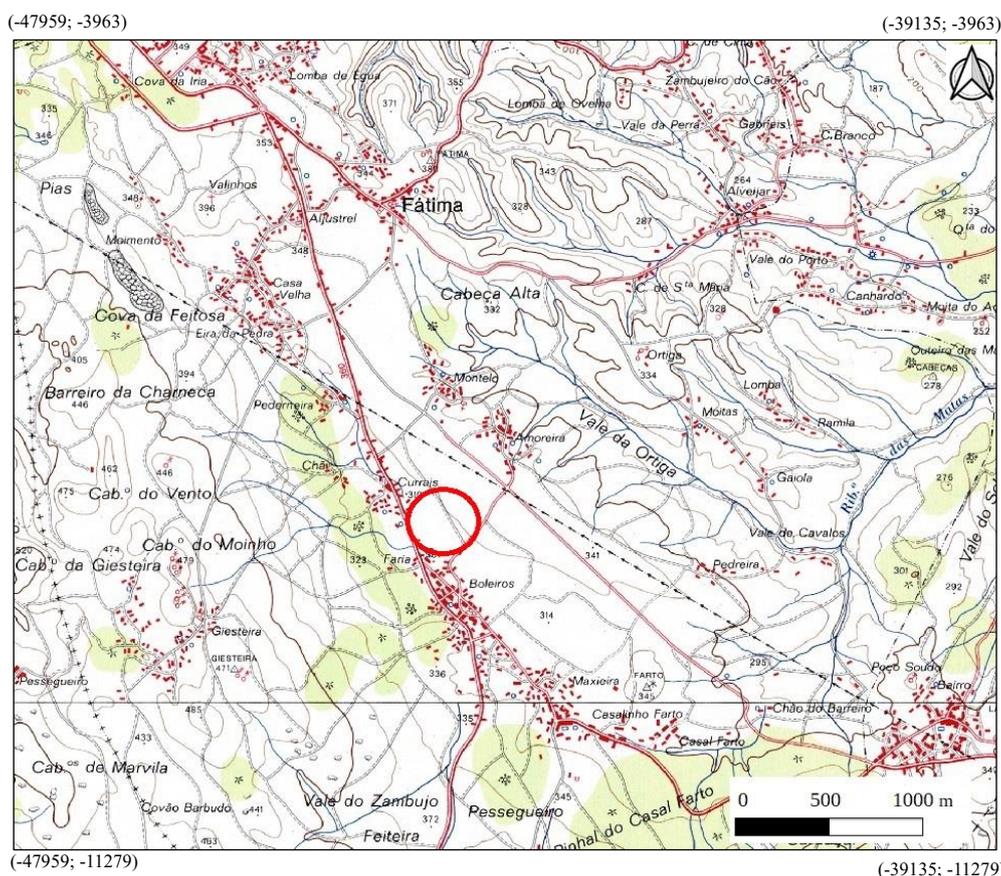


Figura 5: Localização da área de estudo (assinalada no círculo a vermelho) no excerto da folha nº 309 de Vila Nova de Ourém da Carta Militar, à escala 1:50 000, Datum: EPSG 3763 (Fonte: DgTerritório- SNIG, 2020)

O acesso às pedreiras é feito pela EN 360 (Estrada de Minde) que pode ser alcançado, tanto de Norte como de Sul do país pela autoestrada A1, na saída de Fátima em direção a Minde.

As pedreiras em estudo localizam-se fora, mas próximo, do limite do Plano de Ordenamento do Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros (POPNSAC) e, segundo o Plano Diretor Municipal (PDM) de Ourém, à data do licenciamento, a área integrava-se na categoria de uso do solo indicada como apta para indústria extrativa (Gold fluvium, 2011), embora o PDM em vigor tenha sofrido algumas modificações. Nesta zona devido à qualidade do recurso geológico, existem vários polos extrativos num raio de aproximadamente 5 km a partir da pedreira EM&R.

3.2. Enquadramento geomorfológico e geológico

Conforme citado por Duarte (2018), a área alvo de estudo faz parte da Bacia Lusitânica, que se insere na Orla Ocidental de Portugal e encontra-se limitada a Norte pela falha da Nazaré, a Este pelo Maciço Hespérico, a Sul pela falha do Arrife e a Oeste pelo *horst* das Berlengas. Esta bacia sedimentar estende-se segundo uma direção NNE-SSW apresentando, aproximadamente, cerca de 250 - 300 km de comprimento e 100 - 150 km de largura (Azerêdo, 1993).

O local insere-se na unidade geomorfológica do Maciço Calcário Estremenho (MCE), que pertence ao setor oriental da Bacia Lusitaniana ou Lusitana (BL) e que se encontra limitado pelas seguintes regiões geomorfológicas: Bacia de Ourém e Bacia do Tejo.

Geologicamente, enquadra-se na Carta Geológica de Portugal, na folha 27-A de Vila Nova de Ourém à escala 1:50 000. A pedra em estudo, encontra-se em terrenos de idade Bathoniana (Jurássico Médio), como se pode observar na figura 6, e situa-se na região do Planalto de São Mamede e Serra de Aire, que é caracterizada por constituir uma extensa região planáltica que se encontra separada da Plataforma Litoral pelos relevos de Alqueidão da Serra, que se interpõem entre o Vale do Lena e a escarpa de falha de Reguengo do Fetal (Manuppella, *et al.*, 2000).

A litologias identificadas no MCE têm idades que variam desde o Jurássico Inferior (Hetangiano) até ao Pliocénico, embora no local em estudo sejam, maioritariamente, do Jurássico Médio (Bathoniano Superior – Caloviano) até ao Jurássico Superior (Oxfordiano Inferior), limitadas por descontinuidades, correlacionadas com episódios tectónicos resultantes da evolução da Bacia Lusitânica, conforme citado em Duarte (2018).

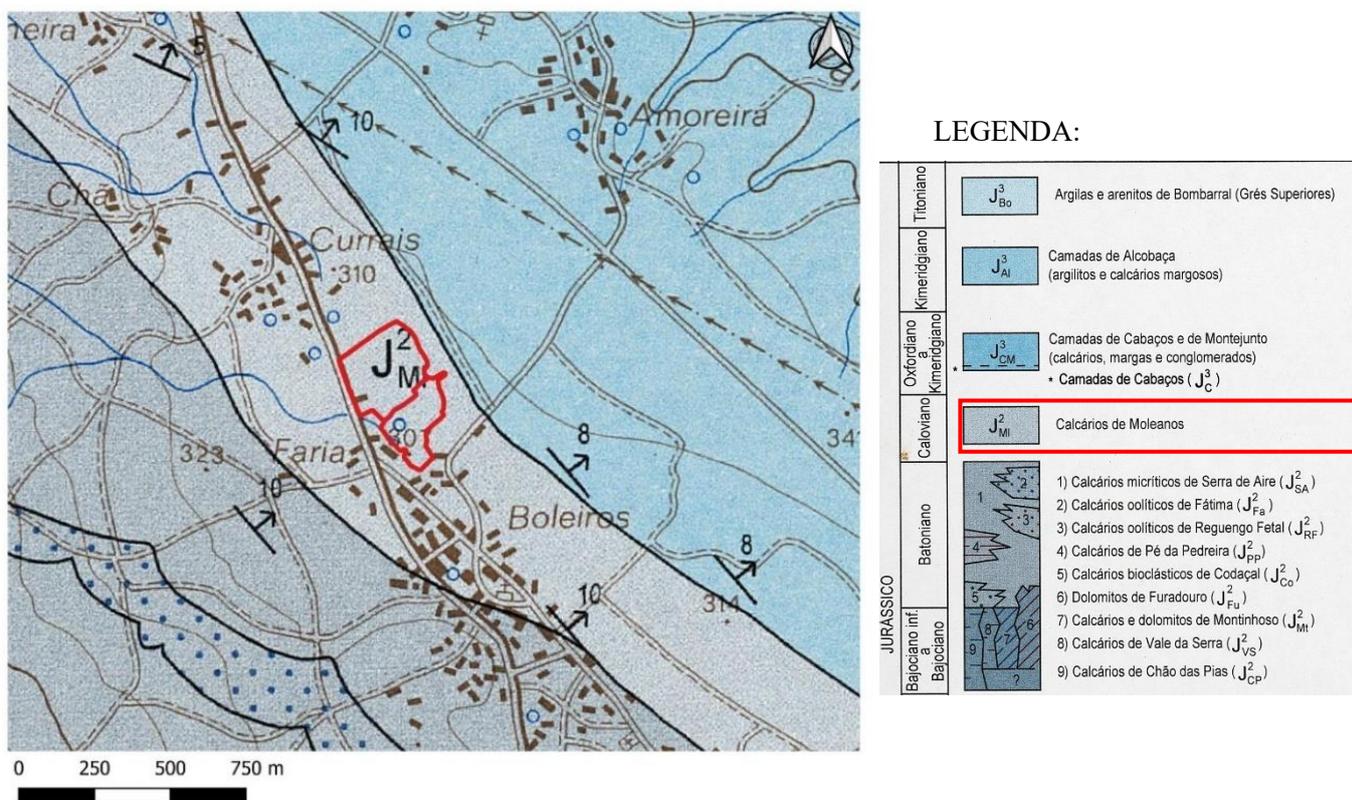


Figura 6: Representação das áreas de exploração nas unidades geológicas aflorantes na área de estudo (Calcário de Moleanos) (delimitado a vermelho na carta e assinalada a vermelho na legenda). Extrato da Carta Geológica de Portugal 27-A, à escala 1:50000 (Manuppella, *et al.*, 1998).

Segundo Azerêdo (2007), os calcários que afloram e são explorados na zona em estudo pertencem à *Formação de Santo António – Candeeiros: Membro de Moleanos* (J²_M), que têm correspondência com os *Calcários de Moleanos* (Manuppella *et al.*, 1998; Manuppella *et al.* 2000) (figuras A1, A2 no anexo).

Esta formação ocorre em vários locais, nomeadamente nas duas extremidades da área do Dogger do MCE, cartografada na zona Norte da Serra dos Candeeiros (faixa mais ou menos triangular cortada por falhas, na zona de Cabeço Grande e Pedreiras-Vale Travelho) e para Oeste desta, bem

como nas proximidades de Fátima. Neste último local, é constituída por uma mancha em forma de crescente com convexidade para Sul, praticamente paralela à dos *Calcários oolíticos de Fátima*, mas com uma maior extensão (desde as proximidades da Cova de Iria até Outeiro das Matas) (Manuppella *et al.*, 1998; Manuppella *et al.*, 2000; Azerêdo, 2007).

Na região ocidental do MCE, os *Calcários de Moleanos* (Manuppella *et al.*, 2000) ou *Membro de Moleanos* (Azerêdo, 2007), contactam quase sempre por falha com os *Calcários micríticos de Serra de Aire* (Manuppella *et al.*, 2000) ou *Formação de Serra de Aire* (Azerêdo, 2007), e na região oriental, o contacto é quase sempre normal com esta última unidade e, localmente (em Casal Farto) com os *Calcários oolíticos de Fátima* (Manuppella *et al.*, 2000), parte integrante do *Membro de Pé da Pedreira* (Azerêdo, 2007).

A datação dos *Calcários de Moleanos* foi obtida a partir de dados paleontológicos, que permitiram atribuir a esta unidade a idade do Caloviano.

A formação J^2_{MI} (com cerca de 150 m de espessura) é constituída por calcários clásticos (“rudstones”, “grainstones” e “packstones” oolíticos/bioclásticos/oncolíticos/litoclásticos), geralmente de cor branca ou creme, com intercalações de calcários muito fossilíferos e de calcários pelmicrítico com bioturbação, “filamentos” e amonóides (Manuppella *et al.*, 2000).

Capítulo 4 – Métodos e metodologia

No presente trabalho, foram definidas várias componentes de estudo (figura 7): pesquisa bibliográfica sobre a zona e as metodologias a utilizar, trabalho de campo que inclui o reconhecimento *in situ* das litologias aflorantes, a obtenção das imagens com recurso a VANT, e o trabalho de gabinete/laboratório, onde se analisaram os dados de campo e se procedeu à utilização de programas informáticos para criar modelos fotogramétricos e ortofotomapas seguidos da classificação assistida automática. Por fim compararam-se as amostras recolhidas em campo representativas do material que aflora no local com os resultados da classificação supervisionada do mesmo local.

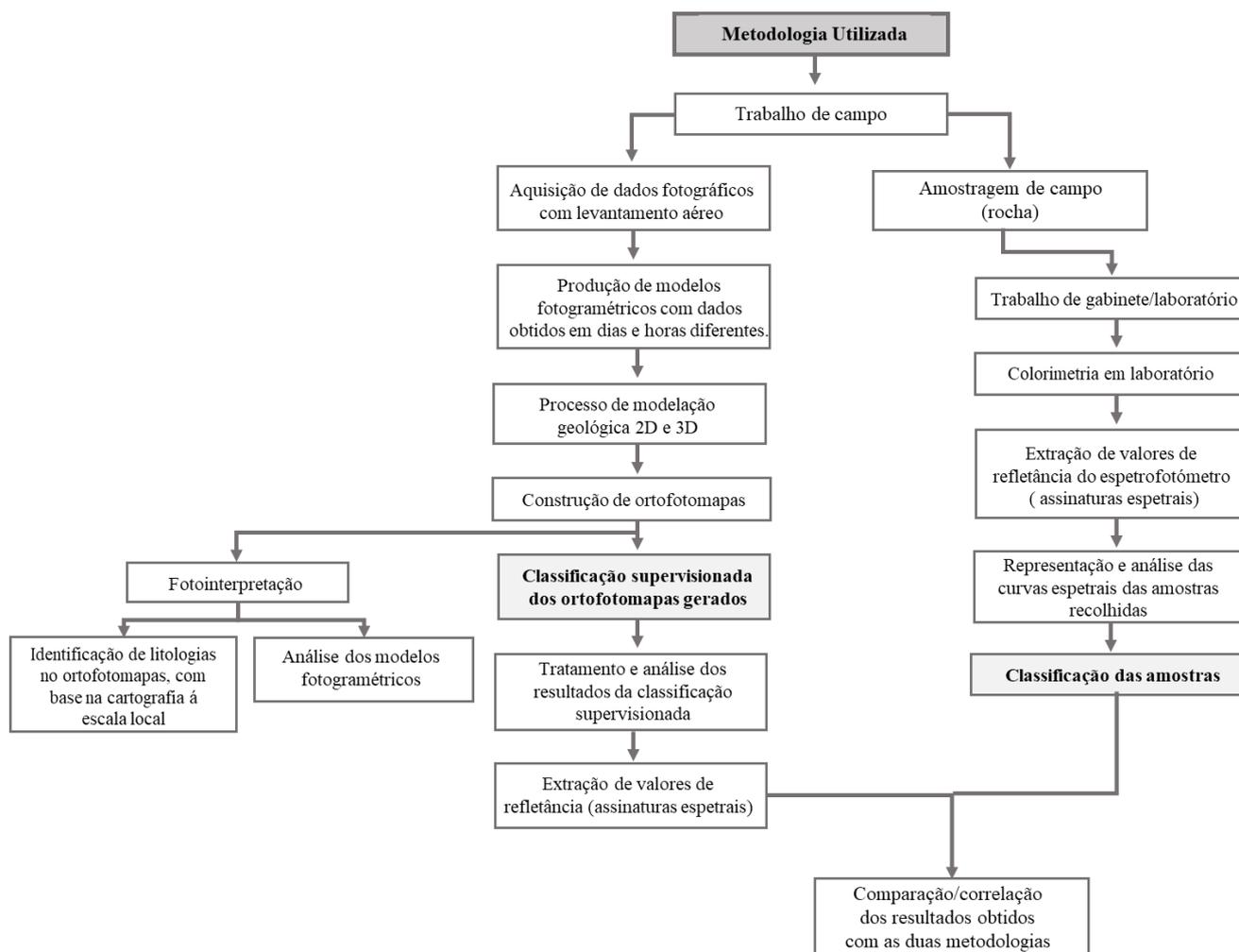


Figura 7: Diagrama da metodologia adotada.

4.1 Trabalho de campo

Para alcançar o objetivo definido neste trabalho, foi necessária a obtenção de imagens com muito alta resolução, que permitisse a identificação de cada classe de rocha com a maior precisão e rigor possível. Embora atualmente a Deteção Remota permita a obtenção de imagens de satélite (orbitais) com uma resolução espacial entre 30 cm e 5 m por *pixel*, grande parte dessa informação

não está disponível gratuitamente para o público, e a que está disponível, não possui uma resolução espacial suficientemente boa, para a finalidade do trabalho. Como se pretendia um melhor detalhe nas imagens a utilizar, foi necessário optar pela recolha de imagens aéreas de alta resolução, recorrendo para isso à utilização de um veículo aéreo não tripulado (VANT), que possui um sensor ótico com uma alta resolução espacial (na ordem dos centímetros). Optou-se por este equipamento devido ao fato de possuir a capacidade de identificar elementos de terreno de pequenas dimensões, mas comparativamente aos satélites, apresentar menos interferências atmosféricas.

Para o levantamento aerofotográfico, utilizou-se o VANT, modelo DJI *Phantom 4* equipado com uma câmara FC330 (figura 8), com as características e configurações apresentadas nas tabelas 2 e 3 e cujas imagens geradas possuem uma dimensão de 4000x3000 *píxeis*.

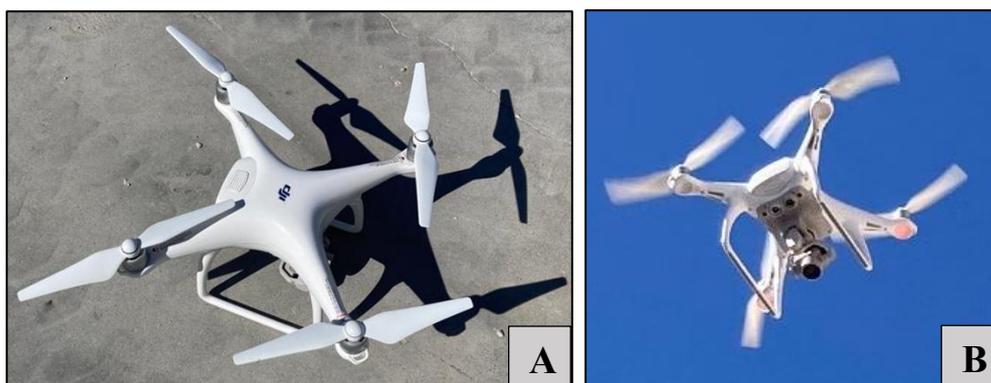


Figura 8: Modelo de VANT utilizado no levantamento aerofotográfico. (A- vista superior, B- vista inferior).

Tabela 2: Características da aeronave utilizada na captura de imagens (Fonte: DJI)

Funcionalidades da aeronave	
Peso (bateria e hélices incluídas)	1380 g
Velocidade máxima	Modo S: 20 m/s
Resistência máxima da velocidade do vento	10 m/s
Tempo máximo de voo	Aproximadamente 28 minutos
Faixa de temperatura operacional	0° a 40°
Sistema de posicionamento por satélite	GPS/GLONASS

A porção do espectro eletromagnético que o sensor ótico acoplado no VANT consegue discriminar, limita-se às faixas espectrais do visível, denominado por campo RGB.

A cobertura fotográfica é um processo crucial para que o resultado obtido seja o ideal, e por isso, é de extrema relevância que a precisão e a qualidade das imagens seja elevada. Assim, antes de iniciar a recolha fotográfica, é importante proceder à calibração da câmara, a partir do apêndice do programa *Agisoft Metashape*, o *Agisoft Lens* (Valente, 2019).

Tabela 3: Configurações fotográficas da câmara do VANT utilizado (*DJI Phantom 4*)

Funcionalidades da câmara	
Fabricante da câmara	DJI
Modelo da câmara	FC330
F-stop	F / 2,8
Tempo de exposição	1 /4000 seg.
Velocidade ISO	ISO-100
Distância focal	4 mm
Abertura máxima	f/2,97

De maneira a proceder à calibração da câmara existe um “tabuleiro de xadrez” ou “*chessboard pattern*” o qual é fotografado com a câmara de vários ângulos (figura 9). As fotografias obtidas serão posteriormente inseridas no apêndice do programa *Agisoft Lens*, para obter uma lista de parâmetros de calibração e gravados num ficheiro em formato LNZ, que é depois introduzido no programa *Agisoft Metashape* (Valente, 2019).

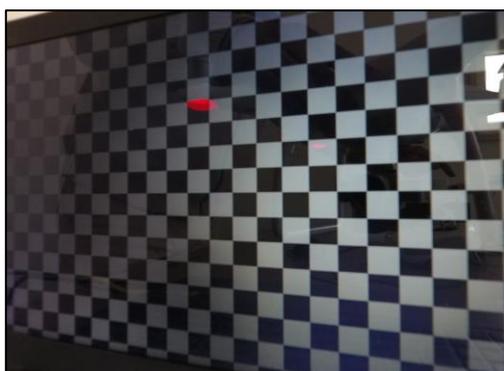


Figura 9: *Chessboard pattern* utilizado na calibração da câmara.

No caso em estudo, foram realizados vários voos, em dias diferentes e com condições atmosféricas diferentes, de maneira a entender quais as influências que estas variações poderiam ter no modelo final.

O processo tem início com a calibração da câmara do dispositivo, seguida do planeamento dos voos. Recorreu-se a algumas aplicações, nomeadamente, a *Drone Deploy* e a *DJI Go 4* que foram utilizadas para efetuar o ajuste manual do aparelho, nos parâmetros de abertura da câmara e do Intervalo de Sensibilidade Fotográfica (ISO), visto que se verificava uma grande diferença na exposição da luz, na zona da pedreira (que se apresentava muito clara) relativamente à parte exterior da mesma (que se apresentava mais escura, com vegetação, casas e estradas, etc). Definiu-se o ISO e a abertura para a condição atmosférica que se verificava na altura da captura.

A aplicação *Drone Deploy* permitiu efetuar o mapeamento automatizado e autónomo, com a introdução dos parâmetros do plano de voo pretendidos (altitude, direção, sobreposição, etc), tendo em conta a finalidade do trabalho.

Para o trabalho em estudo, foram realizados três voos em dias distintos:

No dia 4 de abril de 2022, foram realizados dois levantamentos sendo um às 10:00 da manhã e outro às 12:00, ambos com um ângulo de aproximadamente 90° com a superfície (*nadir*). Relativamente às condições atmosféricas verificadas neste dia, o céu encontrava-se limpo.

O outro voo foi efetuado no dia 27 de maio de 2022, pelas 10:00 da manhã, e as condições atmosféricas que se verificavam neste dia correspondem a céu quase limpo, com algumas nuvens, isto é, condições atmosféricas semelhantes ao dia 4 de abril. Por razões de segurança não foi possível a realização neste dia do voo das 14:00 devido à velocidade do vento.

Embora realizado com objetivos distintos foi efetuado um voo no dia 17 de março de 2022, que será utilizado em termos comparativos. Neste dia as condições atmosféricas foram bastante distintas dos outros dias, correspondendo à passagem na atmosfera duma pluma de poeiras vindas de África. Na tabela 4 são apresentados os parâmetros definidos para cada voo.

Tabela 4: Informação de aquisição das fotografias de todos os voos realizados.

Levantamento fotográfico realizado via VANT	4 de abril 2022 (1)	4 de abril de 2022 (2)	27 de maio de 2022	17 de março de 2022
Hora do voo	10:00	12:00	10:00	10:00
Número de imagens	50	64	157	173
Altitude do voo	92 m	91,5 m	103m ou 89m*	103 m
Resolução do solo (GSD)	3,45 cm/pix	3,49 cm/pix	3,8cm/pix	3,8 cm/pix
Área Coberta	0,157 km ²	0,159 km ²	0,241 km ²	0,241km ²
Estações da câmara	50	64	157	173
<i>Tie Points</i>	70 738	87 053	158 824	131 935
Projeções	185 306	248 503	584 900	586 317
Erro Projeção	0,852 pix	0,794 pix	1,15 pix	1,54pix
Sobreposição longitudinal das fotografias	70%	70%	75%	70%
Sobreposição transversal das fotografias	60%	60%	60%	60%

*Embora a altitude de voo definida tenha sido 89m (na aplicação *Drone Deploy*), a informação registada no sistema foi de 103m (segundo o *Agisoft Metashape*) podendo a diferença de altitude ser devido à velocidade do vento.

No caso da utilização de equipamentos como os VANT's, comparativamente aos satélites, é essencial que a sobreposição das fotografias seja maior devido ao processo de obtenção automática de pontos homólogos e aos erros associados na determinação das posições da câmara (Duarte & Gonçalves, 2015).

O planeamento dos levantamentos aerofotográficos com base nos parâmetros mencionados está apresentado na figura 10, com as respetivas malhas de voo.

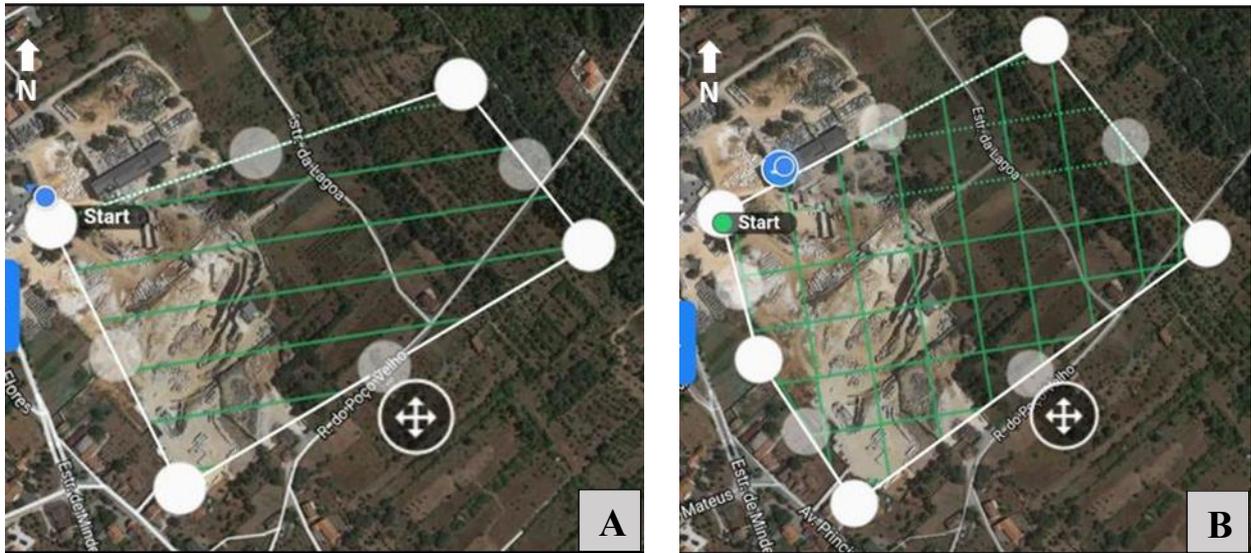


Figura 10: Malha de voo efetuada na app *Drone Deploy* correspondente ao dia 4/4/2022 (A) e dia 27/05/2022 (B). Fonte: Captura de ecrã da aplicação *Drone Deploy*.

A malha definida no primeiro voo realizado 04/04/2022, abrange uma maior área de vegetação e a densidade de captura é maior que no voo do dia 27/05/2022 onde a grelha realizada teve características diferentes.

Na figura 11, são apresentados os modelos com a localização da câmara ao longo do voo e com a sobreposição das fotografias em diferentes pontos, nos vários voos. As zonas de maior interesse apresentam uma maior sobreposição de imagens (máximo de 9 fotografias) e os locais de menor interesse possuem uma menor sobreposição, atingindo no limite da área, um mínimo de 1 fotografia.

A escala de cores evidencia o número de imagens sobrepostas, verificando-se na área central a tonalidade azul (maior número de fotografias sobrepostas) o que corresponde à zona extrativa onde se pretendia maior qualidade da aquisição de dados.

A metodologia aplicada no processamento das fotografias e criação do modelo final, foi igual para todos os modelos, sendo por isso apresentado somente o voo 04/04/2022 12:00 realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas com carácter exemplificativo. Tanto neste, como nos restantes modelos gerados, a qualidade dos parâmetros de processamento escolhida foi sempre elevada, devido à finalidade do trabalho.

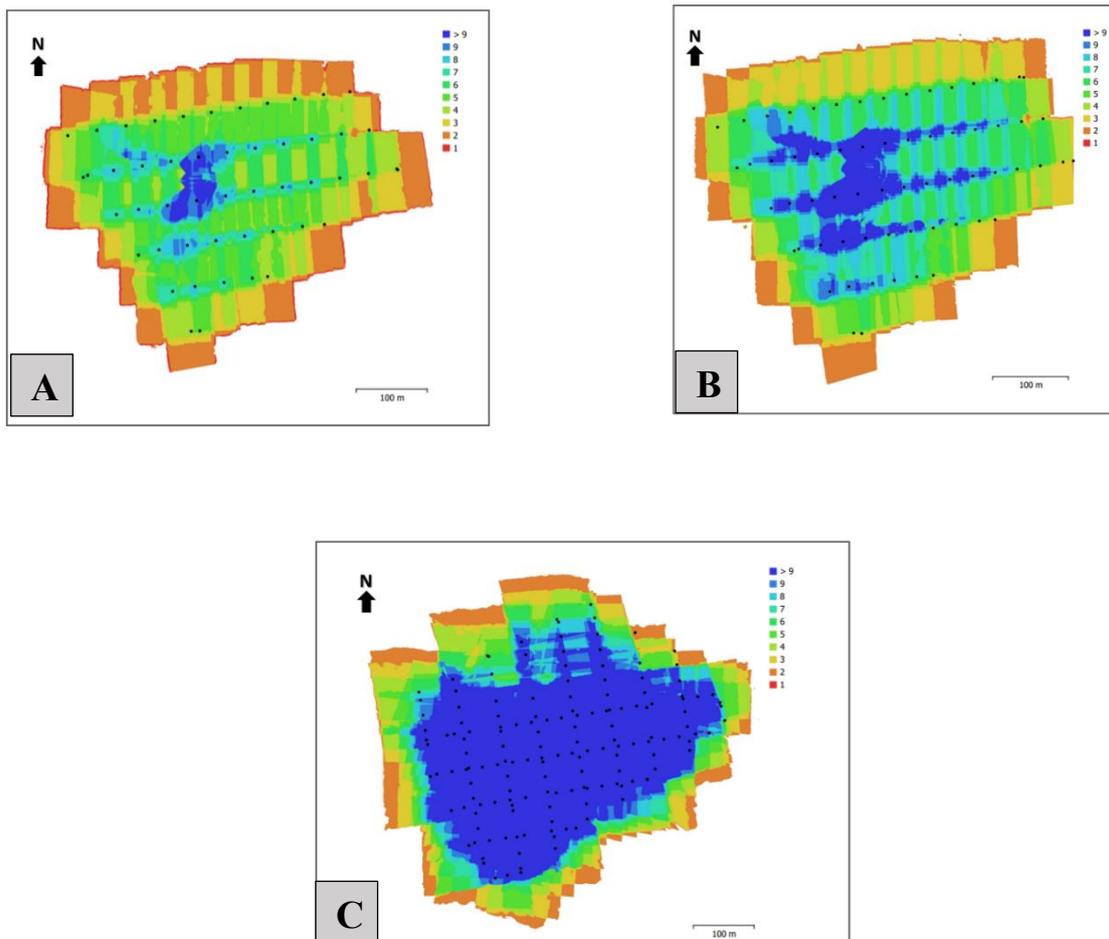


Figura 11: Localização da câmara e da sobreposição das imagens, nos dias 04/04/2022 10:00 (A) dia 04/04/2022 12:00 (B), 27/05/2022 10:00 (C). Fonte: *Agisoft Metashape*.

Com o objetivo de corrigir erros posicionais, procedeu-se ao levantamento de 5 pontos de controlo (GCP's) com recurso a equipamento topográfico. Os GCP's são pontos fotoidentificáveis nas imagens com coordenadas conhecidas representados por alvos ou detalhes no terreno que irão aparecer nas fotografias aéreas e são utilizados para melhorar a qualidade posicional dos produtos cartográficos gerados (DroneEng, 2018).

O erro médio de posicionamento está na ordem dos centímetros, sendo que para os modelos do dia 4 de abril de 2022 e para o modelo do dia 27 de maio de 2022, varia entre 1cm e 5 cm e no modelo do dia 17 de março de 2022 verifica-se um maior erro associado ao posicionamento, atingindo valores da ordem dos 30 cm.

Foi efetuado um levantamento topográfico no *Datum 73* (atualmente conhecido por sistema PT-TM06-ETRS89) com a utilização de um GPS (*Global Positioning System [GPS] / Global Navigation Satellite System*) e uma Estação Total (Topocom Gpt 7003), para efetuar a calibração. A partir daí retiraram-se as localizações visíveis do levantamento topográfico para identificar os pontos de controle.

4.2 Processamento de imagens

Para a realização e processamento dos dados do levantamento foram consideradas as seguintes etapas no programa *Agisoft Metashape* (figura 12):

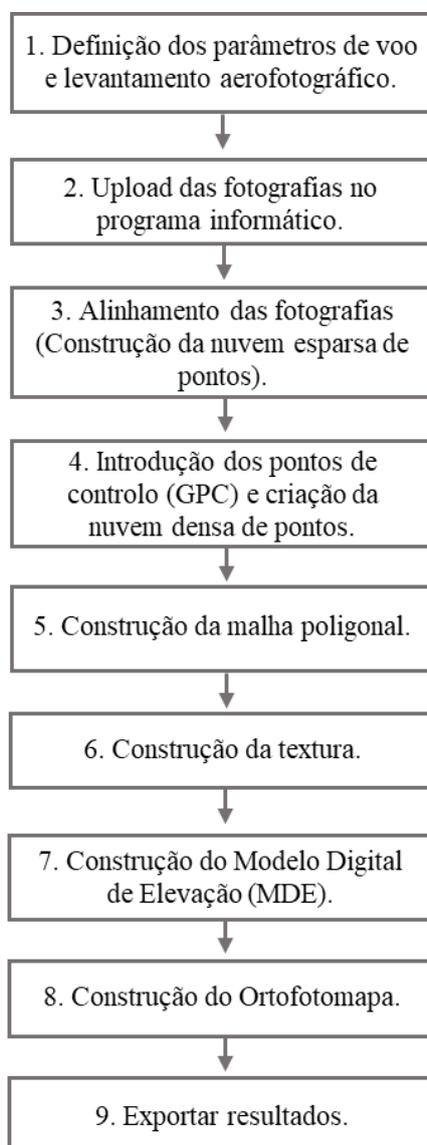


Figura 12: Diagrama representativo do processo fotogramétrico com a descrição dos passos a desenvolver no *Agisoft Metashape*. Adaptado de Duarte (2018)

Inicialmente, foi efetuada uma análise das fotografias adquiridas, de maneira a selecionar as que correspondiam aos parâmetros de qualidade de imagem pretendidos, tais como a luminosidade, o contraste, a existência de defeitos provocados por fenómenos atmosféricos ou do local, e o arrastamento do *pixel* nas fotos.

Uma vez feita a seleção das fotografias, estas foram introduzidas e processadas no programa *Agisoft Metashape*, definindo o sistema de coordenadas, que deve corresponder ao mesmo utilizado nos pontos de controlo, tendo sido utilizado o Datum 73. Foi efetuada a introdução dos parâmetros de calibração da câmara.

O segundo passo do processamento é o alinhamento das fotografias (figura 13). Relativamente ao alinhamento das fotografias para o voo 04/04/2022 12:00 os parâmetros definidos encontram-se na tabela 5.

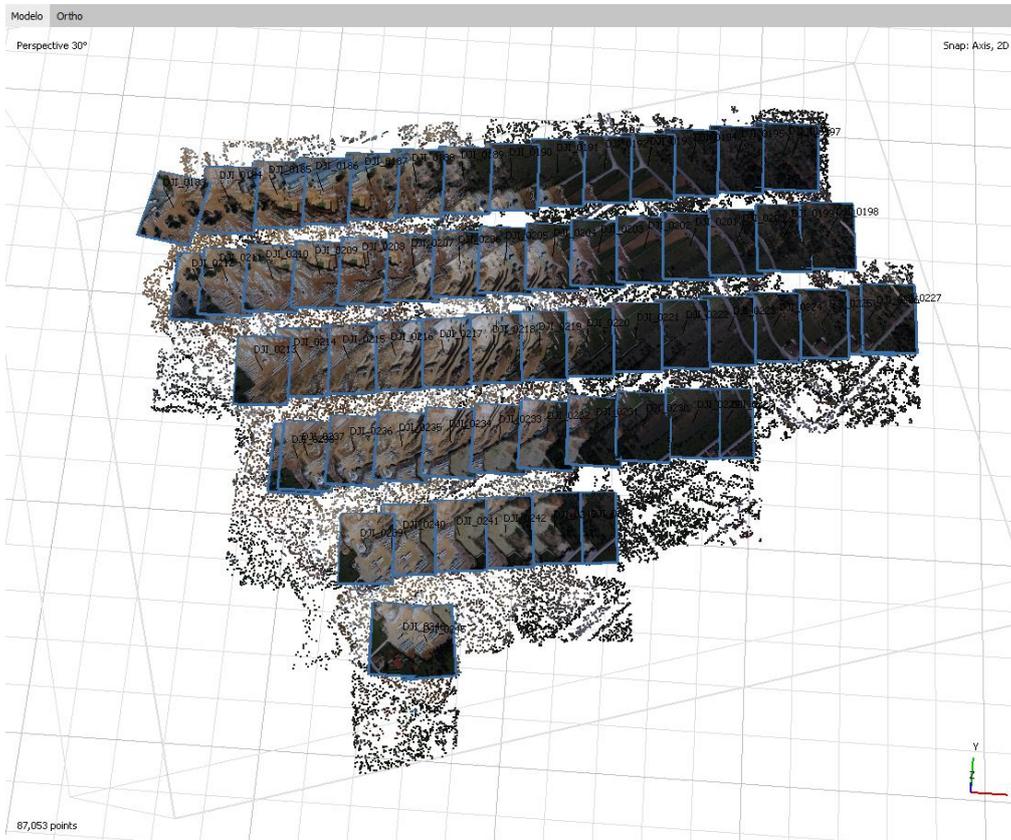


Figura 13: Exemplo do alinhamento das fotografias no *Agisoft Metashape* e respetivo posicionamento do dispositivo aquando da captura das fotografias do voo 04/04/2022 12:00 (Fonte: *Agisoft Metashape*)

Tabela 5 - Parâmetros utilizados no alinhamento das fotografias.

Parâmetros	Valor / Opção
Exatidão (<i>Accuracy</i>)	Elevada (<i>high</i>)
Par de pré-seleção (<i>Generic preselection</i>)	Sim
Número limite de pontos de referência (<i>key point limit</i>)	40 000
Número limite de pontos de ligação (<i>tie point limit</i>)	4 000
Número de pontos	86 430 de 91 474

Nesta etapa de alinhamento das fotografias (*align photos*) o programa vai identificar pontos em comum e compará-los entre si, de maneira a calcular a posição da câmara face à área, definida pelos parâmetros de orientação da câmara (translação e rotação). Relativamente ao tempo de processamento, este é dependente da exatidão (*accuracy*) pretendida, tendo sido escolhida a opção elevada (*high*). Foi ainda ativada a opção *Exclude stationary tie points* que ajuda a eliminar falsos

tie points, relacionados com o sensor de câmara ou ruído da lente. De maneira a melhorar os resultados do alinhamento das fotografias, podem ser removidas ou realinhadas fotografias que estejam posicionadas incorretamente, e excluir as que estejam desfocadas.

A próxima etapa corresponde à criação de uma nuvem de pontos densa (*build dense cloud*) representativa da área fotografada, que através de técnicas de aerotriangulação das posições, leva à combinação de pontos em comum entre as imagens (tabela 6). O resultado da nuvem densa de pontos, está apresentado na figura 14.

Na escolha da qualidade do modelo, optou-se pela opção *high* (elevada) para a criação da nuvem densa de pontos de maneira a obter uma geometria mais detalhada e precisa, resultando num tempo de processamento maior comparativamente à opção *medium* ou *low*.

No filtro de profundidade, a opção escolhida foi o *Mild* (filtragem de profundidade suave), visto que com esta opção os pequenos detalhes são distinguidos no modelo e não classificados como *outliers* (Agisoft LLC, 2022). Nesta etapa é importante remover o ruído/artefactos associado à captura das fotografias.

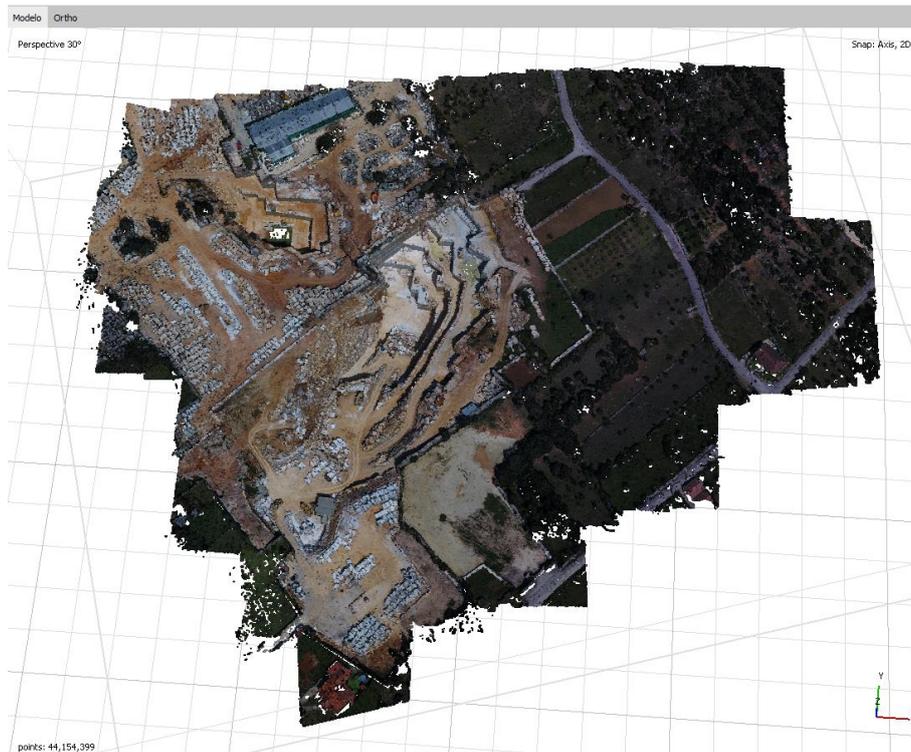


Figura 14 – Exemplo da visualização da nuvem densa de pontos.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados na construção da nuvem densa de pontos.

Parâmetros	Valor /Opção
Qualidade (<i>Quality</i>)	Elevada (<i>high</i>)
Filtro de profundidade (<i>Depth Filtering</i>)	Moderado (<i>Mild</i>)
Número de pontos	44 712 506

Uma vez que a posição e orientação da câmara foi estimada pelo programa *Agisoft Metashape*, tendo em conta a informação contida em cada fotografia, esta pode apresentar erros associados nas estimativas finais, que pode, por sua vez, levar a deformações no modelo final (Lima, 2016 citado em Duarte, 2018). Para evitar esta situação foi introduzida a informação dos GPC's.

Depois de efetuada a georreferenciação da imagem com os GPC's, estes devem ser marcados no sistema de coordenadas (figura 15) com o reposicionamento dos pontos, seguida da reconstituição da nuvem de pontos densa. Efetuou-se a transposição destes pontos de controlo para os restantes ortofotomapas/modelos gerados. Com a transposição destes será de esperar que existam algumas variações posicionais nos modelos, na ordem dos centímetros, mas não terá nenhum impacto na identificação da cor.

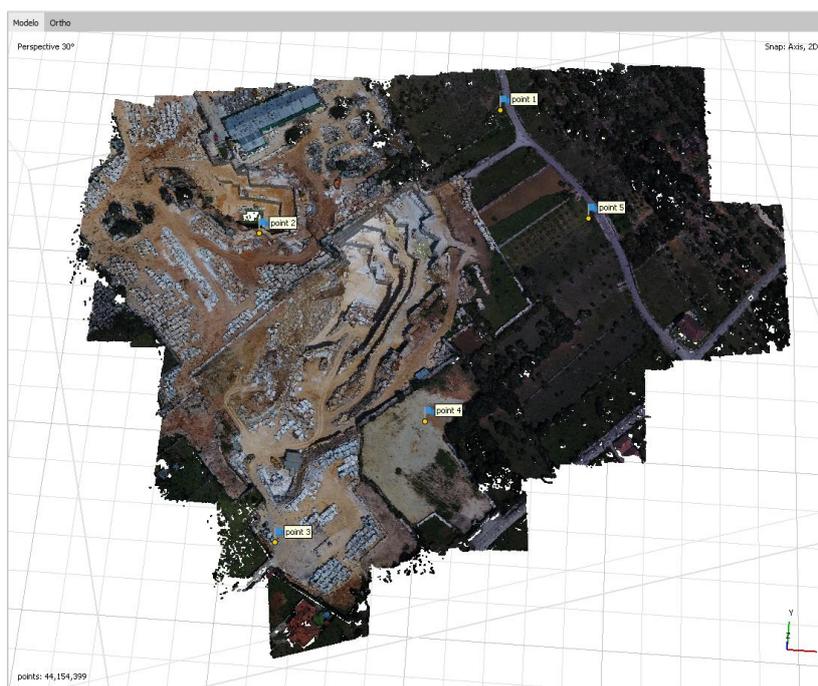


Figura 15 – Imagem correspondente à introdução dos pontos de controle (GCP) no modelo.

Após o recálculo da nuvem de pontos com a introdução dos pontos de controle no programa, procedeu-se à reconstrução da malha poligonal 3D (*build mesh*) a partir da informação da nuvem de pontos densa (figura 16) com os parâmetros de configuração apresentados na tabela 7. Foi seleccionada a opção “Calcular as cores do vértice” que permite que os dados de origem que têm informações sobre a cor, sejam calculados para os vértices da malha (Agisoft LLC, 2022).

Tabela 7 – Parâmetros utilizados na construção da malha poligonal 3D.

Parâmetros	Valor /Opção
Tipo de superfície (<i>surface type</i>)	Arbitrário (3D) (<i>Arbitrary</i>)
Pesquisa de data (<i>source data</i>)	Nuvem densa (<i>Dense cloud</i>)
Número de faces (<i>face count</i>)	Elevada (8 942 496)



Figura 16 – Imagem correspondente à construção da malha poligonal 3D.

De seguida, procedeu-se à construção da textura (*build texture*), que permite a visualização do modelo com a textura das imagens originais no modelo. Esta etapa de texturização do modelo é um passo determinante, quanto à qualidade final, e é nesta fase que o modelo apresenta uma maior semelhança ao que se observa na realidade. Os parâmetros utilizados estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8– Parâmetros utilizados na construção da textura.

Parâmetros	Valor
Tipo de textura (<i>texture type</i>)	<i>Diffuse map</i>
Fonte de dados (<i>source data</i>)	<i>Images</i>
Modo de mapeamento (<i>mapping mode</i>)	Ortofoto (<i>Ortophoto</i>)
Modo de combinação (<i>blending mode</i>)	Mosaico (<i>Mosaic</i>)
Tamanho de textura (<i>texture size</i>)	4096 x 4096

Na escolha do tipo de textura selecionou-se a opção *diffuse map*, que armazena as cores da superfície do modelo e o modo de mapeamento selecionado, foi a ortofoto, o que indica que toda a superfície do objeto é texturizada na projeção ortográfica.

Uma vez elaborado o modelo texturizado, passou-se à criação do Modelo Digital de Elevação (MDE) função da altimetria do terreno. Este é um modelo 2,5D (figura 17), que representa a projeção do modelo 3D no plano. A construção do MDE permite a obtenção de valores da área e

volume de todo o modelo, tornando-se uma ferramenta importante para a indústria extrativa, e sem a construção deste, não seria possível a criação do ortofotomapa.

Por fim, é finalizada a criação do modelo 3D, com a obtenção do ortofotomapa (figura 18), que permitiu uma reprodução detalhada da área de estudo. Todos os modelos foram exportados no sistema de coordenadas EPSG:32629 (WGS 84/ UTM zona 29N).

Uma vez finalizada a fase de processamento de dados no *Agisoft Metashape*, é iniciada a etapa de processamento no programa SIG, o *QGIS*.

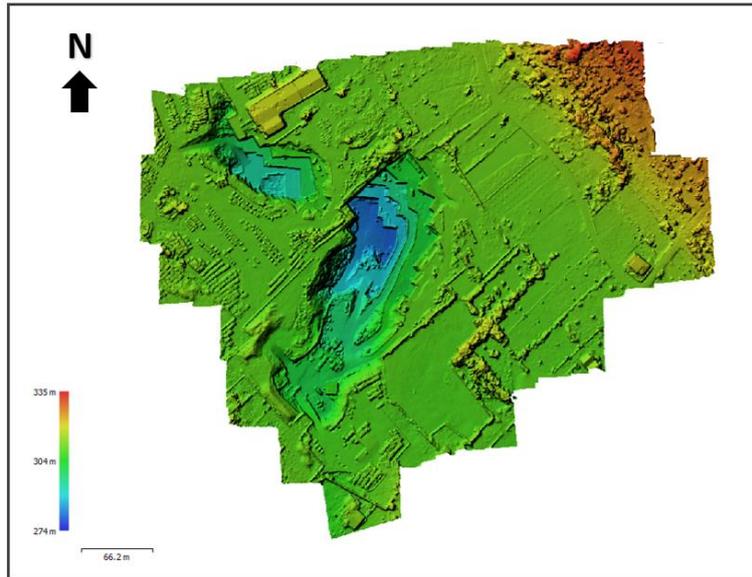


Figura 17 – Imagem correspondente ao MDE exemplificativo.

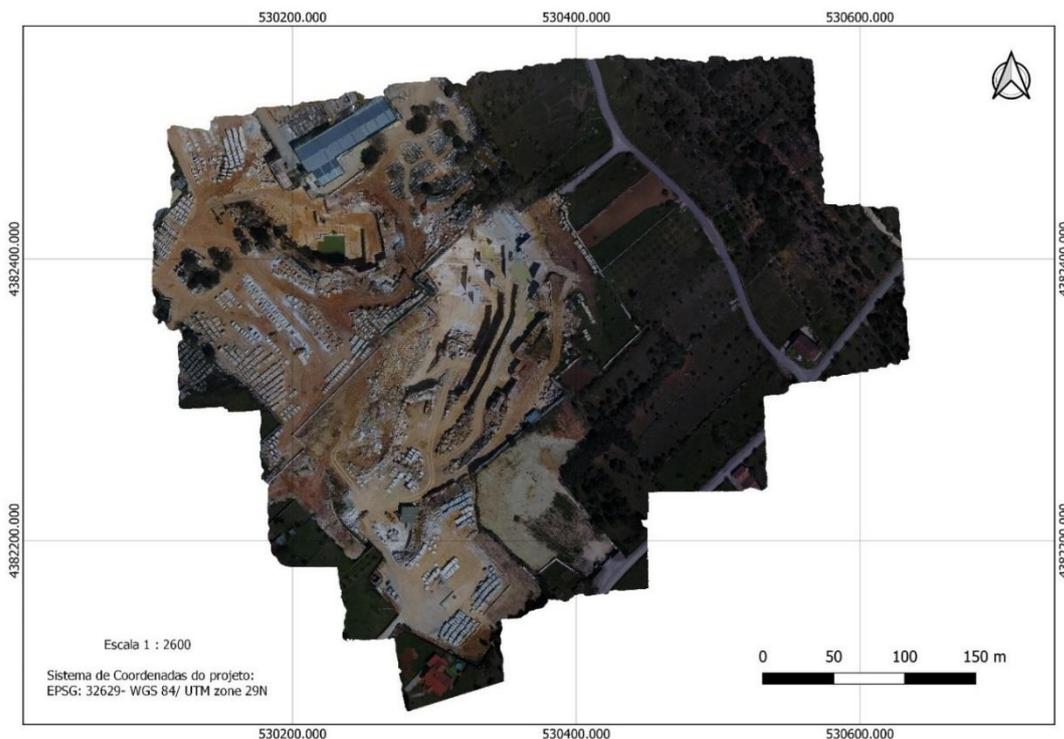


Figura 18 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 04/04/2022 12.00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.

4.3 Processamento e classificação no *QGIS*

A classificação supervisionada requer o conhecimento prévio de algumas características da área de estudo. Assim, é necessário que o utilizador identifique alguns *pixeis* pertencentes à classe com as características adequadas, e assim o computador com base em regras estatísticas pré-estabelecidas encarrega-se de associar os outros *pixeis* pertencentes à mesma classe (Filho, 2005).

Uma vez elaborados e exportados os ortofotomapas criados das áreas correspondentes às pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720, no programa *Agisoft Metashape*, recorreu-se à utilização do programa *QGIS*, que permitiu a realização da classificação supervisionada com o *plugin SCP*, utilizando técnicas de interpretação visual de imagem.

No caso de aplicação em estudo, as imagens captadas com VANT são imagens RGB com 3 bandas do espectro visível.

O processo de classificação foi efetuado no modelo 04/04/2022 12:00 que foi tido como exemplo, no qual se começou por definir o sistema de coordenadas, introduziu-se o ortofotomapa e aplicou-se o *plugin Semi-automatic Classification*.

É necessário selecionar as bandas que o sensor discrimina, onde são definidas as informações relacionadas com o comprimento de onda central de cada banda, obtendo uma imagem compósita RGB, neste caso o ortofotomapa.

O ortofotomapa pode ser apresentado em cor natural, composto pela combinação das bandas 1-2-3, que correspondem aos campos banda vermelha (Br), banda verde (Bg), e banda azul (Bb), respetivamente (figura 19A). Foram testadas outras composições de cor que pudessem facilitar o processo de discriminação dos diferentes tipos litológicos, nomeadamente a composição falsa-cor RGB 3-2-1 (figura 19B) e 3-1-2 (figura 19C). A diferente composição de cores RGB, permitiu tornar mais evidente os materiais litológicos e facilitou a construção dos polígonos de amostragem.

De maneira a facilitar o processo de classificação da imagem, foi efetuado um recorte da imagem, evidenciando apenas a área compreendida pelas pedreiras e pelos blocos extraídos da mesma, numa tentativa de focar a classificação nos calcários e não nos elementos envolventes (como a vegetação, habitações etc.).

Uma vez definida e recortada a área de interesse, utilizamos o *plugin SCP* que foi projetado para efetuar a classificação do uso e ocupação do solo e dos seus elementos.

O processo de classificação supervisionada exige que o utilizador defina regiões de interesse (*Regions of Interest - ROI's*) ou áreas de treino, para cada classe de cobertura terrestre identificada na imagem. Para isso, é imprescindível um conhecimento prévio da área analisada, uma vez que a definição dessas regiões é efetuada em locais onde se tenha certeza da ocorrência de um determinado material.

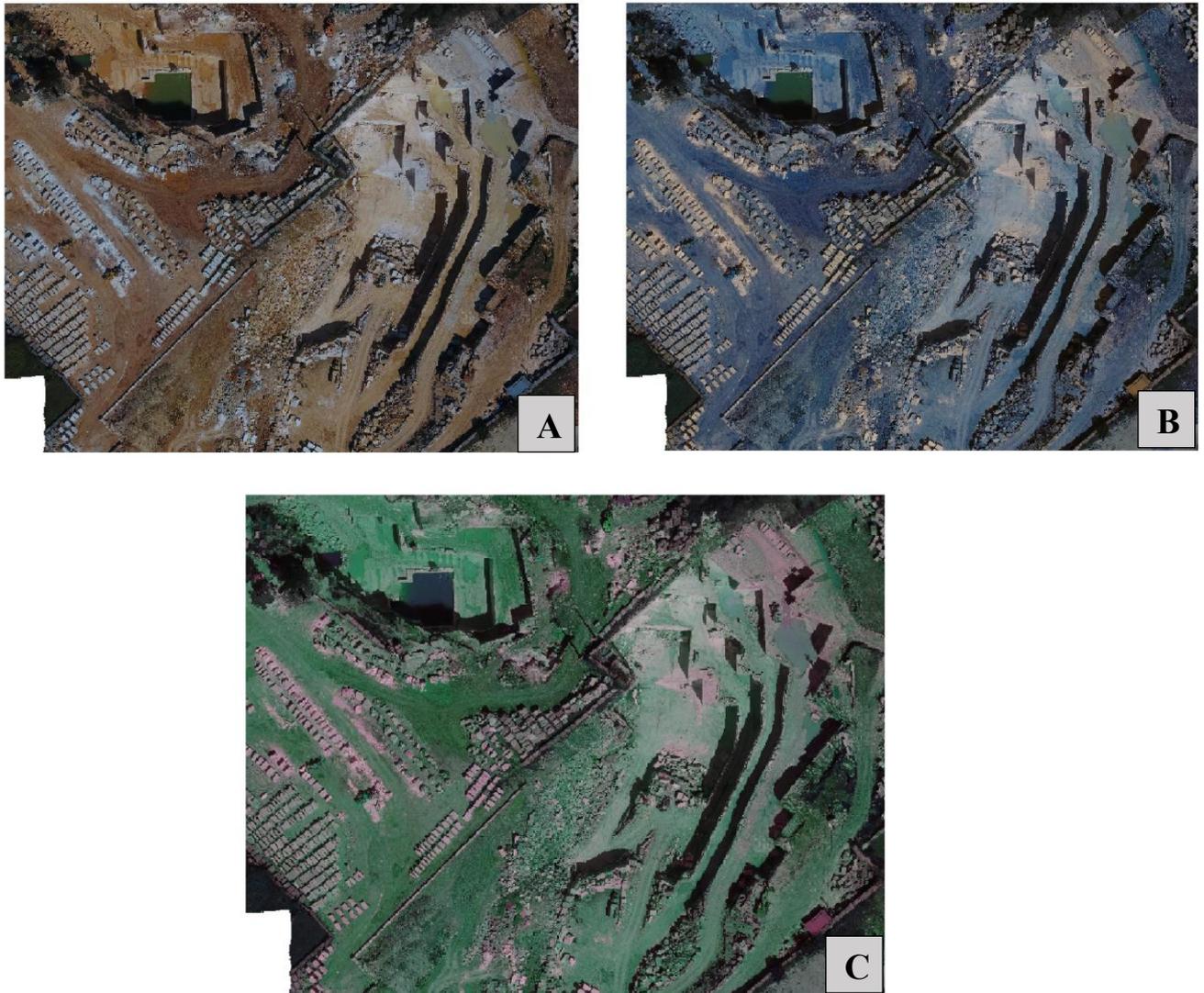


Figura 19: Combinação de cor natural, composição RGB 1-2-3 (A); e as composições de falsa cor RGB 3-2-1 (B) e composição 3-1-2 (C)

A atribuição das Regiões de Interesse (ROI's) pode ser feita através de polígonos de amostragem desenhados sobre áreas homogêneas da imagem que sobrepõem *píxeis* pertencentes à mesma classe de cobertura ou através do *Region Growing Algorithm* ou RGA (algoritmo de crescimento da região) que permite selecionar *píxeis* semelhantes ao primeiro *pixel* selecionado, considerando para isso a distância espectral (similaridade espectral) dos *píxeis* adjacentes, o tamanho mínimo e a largura máxima do ROI (QGIS, 2022).

Neste caso, como se pretende efetuar a distinção litológica entre o mesmo material geológico, é de esperar que as respostas espectrais sejam semelhantes entre si, logo, para o processo de classificação ser fidedigno é importante que tenhamos uma amostra que considere uma variabilidade de valores, para depois o algoritmo conseguir fazer a associação entre as litologias. Desta maneira, para garantir essa variabilidade, recorreu-se à utilização dos polígonos em vez do RGA.

A atribuição de ROI's é um processo iterativo, no qual se vão desenhando os polígonos, e ao mesmo tempo efetua-se uma análise das assinaturas espectrais das amostras nas opções: *Spectral Signature Plot* e *Signature Distances*, contribuindo assim para a diminuição do erro associado à semelhança entre tipos litológicos e para a melhoria da precisão da classificação.

Uma vez que a classificação é efetuada em fotografias tiradas em posição próxima da vertical (nadir), não é possível identificar, todos os tipos calcários, visto que alguns se encontram em profundidades diferentes e por isso no meio de bancadas, não sendo visualizados na imagem planimétrica.

Embora exista a possibilidade de criação de macroclasses (MC ID) e classes (C ID), como o tipo de rocha é somente calcária, optou-se por dividir tudo em diferentes macroclasses, sendo definida, no *SCP dock* ou entrada de treino com o nome “Área de Treino”. De seguida, foram criadas 8 classes de treino segundo o critério de cores:

- Calcário A (●); B(●); C (●); D (●).
- Solo de cobertura seco (●)
- Solo de cobertura molhado (●)
- Solo de cobertura molhado com água (●)
- Solo orgânico (●)

Nas figuras 20A e 20B, encontram-se as ROI's recolhidas para as classes de calcário, e de solo, e as cores atribuídas a cada uma.



Figura 20: Representação de algumas das ROI's coletadas para as diferentes classes de interesse de calcário e solo (A) e (B), no ortofotomapa do dia 04/04/2022 12:00.

A classe dos calcários compreende todos os calcários que ocorrem nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720, a classe do solo compreende todos os tipos de solo, bem como mistura de solo com pó

de pedra, e de solo molhado com água corresponde à acumulação de água que se observa no fundo da pedreira.

O número de *píxeis*/ROI's atribuído a cada classe mapeada, não foi sempre o mesmo, visto que existem classes de interesse mais heterógenas que outras.

Foram coletados entre 6 e 10 polígonos de amostragem para cada classe, com um número de *píxeis* distinto, função da heterogeneidade da classe em que quanto maior for o número de *píxeis* maior a abrangência e variabilidade interna possível em cada classe de interesse. Assim, à medida que são realizadas as amostragens com os polígonos que representam o comportamento de uma dada classe, estes vão sendo registados na lista “*ROI & Signature list*” e a assinatura espectral é calculada passando à escolha do algoritmo de classificação.

O *plugin SCP*, permite efetuar a classificação utilizando um dos algoritmos disponíveis, tais como: Distância Mínima (*Minimum Distance*), Probabilidade Máxima (*Maximum Likelihood*), Mapeamento do Ângulo Espectral (*Spectral Angle Mapping*), e Floresta Aleatória (*Random Forest*) (Congedo, 2021). Depois de efetuada, uma análise visual preliminar dos resultados da classificação com os diferentes algoritmos, optou-se pela utilização do algoritmo *Minimum Distance*, porque apresentava melhores resultados.

Depois de escolhido o algoritmo, existem algumas opções que podem ser ativadas e que poderão melhorar o resultado do mapeamento, tais como *Algorithm, Only overlap, e Land Cover Signature Classification (LCS)*.

Embora o objetivo inicial fosse aplicar o conjunto de treino do modelo do voo 04/04/2022 12:00 aos restantes ortofotomapas gerados, de maneira a perceber as diferenças obtidas e a garantir que a amostragem de treino não consistisse numa fonte de variação, tal não foi possível uma vez que se trata de pedreiras ativas, e os locais que classificamos como ROI's no primeiro ortofotograma, por vezes já não correspondiam ao mesmo alvo nos modelos efetuados em datas ou horas distintas, fazendo com que fosse necessário adaptar os polígonos de amostragem às condições verificadas.

Assim, de maneira a ter um termo de comparação, a definição dos polígonos (ROI's) representativos de cada classe foi efetuada com o mesmo número de amostras para todas as imagens e com aproximadamente o mesmo número de píxeis para os diferentes ortofotomapas, sendo que o classificador foi treinado para cada modelo com as amostras de cada dia.

4.4 Validação de Resultados

Depois de obtidos os diferentes mapas classificados, e com o objetivo de avaliar o desempenho e a eficiência do processo de classificação temática das pedreiras em questão, efetuou-se o cálculo do erro, através da utilização de índices, como o índice *Kappa* (Landis & Koch, 1977; Congalton, 1991).

Assim, procedeu-se ao cruzamento das informações da imagem classificada com os valores de *ground truthing* (realidade de terreno), diferentes dos utilizados na classificação da imagem. Para isso foi necessário criar novas áreas de validação, com características espectrais associadas às

mesmas classes utilizadas anteriormente no processo de classificação, mas diferentes das ROI's utilizadas para treinar o algoritmo.

Depois de criadas estas áreas de validação, selecionou-se a opção *Accuracy*, onde se definiu a classificação a avaliar, a área de validação a utilizar e o campo de referência escolhido, que neste caso foi o MC ID.

Os valores *Kappa* obtidos foram comparados com os valores estabelecidos por Landis & Koch (1977), permitindo avaliar o grau de concordância da classificação temática (tabela 9). Por fim, foi realizada análise dos resultados a partir de uma matriz de contingência ou confusão onde se calcula a exatidão global dos mapas. O valor máximo para o índice *Kappa* é 1, quando a classificação apresenta concordância total entre dados classificados e uma amostra referência.

Tabela 9 – Critérios utilizados na avaliação do grau de concordância da classificação temática com base no índice Kappa (Landis & Koch, 1977).

Valor do coeficiente <i>Kappa</i>	Nível de Concordância
< 0	Não existe concordância
0 – 0,20	Concordância baixa
0,21 – 0,40	Concordância ligeira
0,41 – 0,60	Concordância moderada
0,61 – 0,80	Concordância boa
0,81 – 1,0	Concordância excelente

A precisão da categoria individual foi obtida por meio da razão do número total de amostras classificadas corretamente naquela categoria e o número total de amostras (Ruiz, 1995; Figueiredo & Vieira, 2007, citados em Queiroz *et al.*, 2017).

Na quantificação dos erros foi necessário considerar os erros por omissão e por comissão em percentagens que correspondem, respetivamente, à exatidão do fabricante (*producer accuracy*) e à exatidão do utilizador (*user accuracy*) (Queiroz *et al.*, 2017). A exatidão do fabricante ou produtor está relacionada com as células nas linhas que não foram incluídas na determinação da categoria (definição deficitária da categoria) e a exatidão do utilizador refere-se às células das colunas que representam os *pixeis* que também não foram incluídos em nenhuma categoria (definição excessiva da categoria) (Chuviecco, 1995).

4.5 Medições de cor com espectrofotómetro

Relativamente à componente laboratorial relacionada com a medição de cor em amostras esta foi conseguida por meio de um espectrofotómetro portátil da marca Konica Minolta, modelo CM-700D, utilizando uma abertura com um diâmetro de 8 mm (tabela 10 e figura 21), em condições de luz padrão. Este equipamento mede a refletância espectral na gama do espectro visível (neste caso o aparelho mede no intervalo 400 a 700 nm) e fornecem a curva de distribuição de refletância de amostra, função do comprimento de onda. O programa SpectraMagic NX, versão 2.10, foi utilizado para a visualização e transferência dos valores registados (Konica, 2011).

O número de medições realizadas nas amostras de rocha calcária, variaram entre 4 e 8 função da homogeneidade, sendo o número de medições maior nas rochas mais heterogêneas. Foi posteriormente efetuada uma média dos valores desta medição de maneira a obter o RGB médio de cada amostra (tabela 18).

Uma vez que no equipamento utilizado não existe nenhum tipo de indicação do erro associado à medição, é extremamente importante que este esteja corretamente assente na superfície do alvo, de maneira a evitar a influência de condições externas.

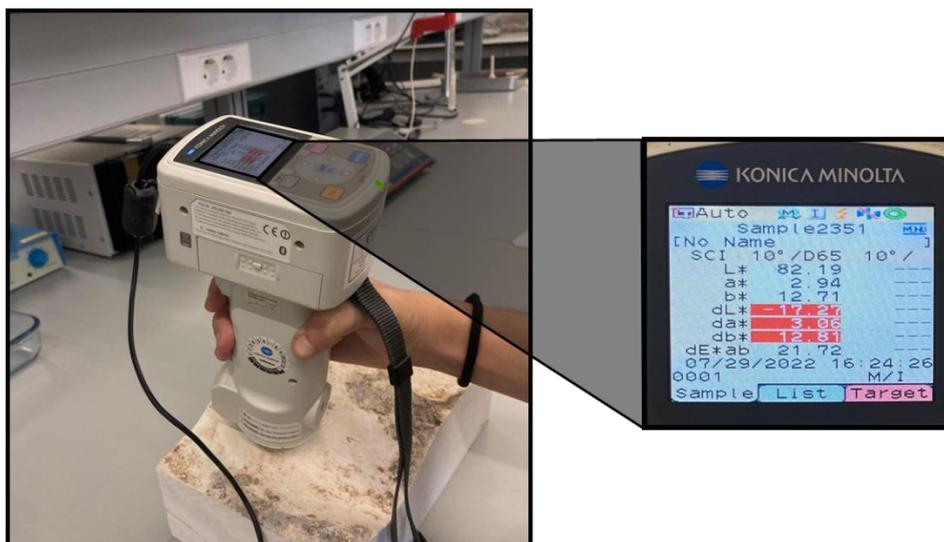


Figura 21: Espectrofotómetro portátil utilizado na determinação da cor (refletância) das amostras de rocha da área em estudo.

Tabela 10 – Especificações técnicas do espectrofotómetro utilizado no estudo (Konica, 2014)

Especificações Técnicas do Espectrofotómetro	
Modelo	CM -700D
Iluminante	D65 (iluminante que se aproxima mais da luz solar)
Faixa de comprimento de ondas	400 a 700 nm
Intervalo de comprimento de onda	10 nm
Faixa de refletância	0 a 175%, Resolução de exibição: 0,01%
Fonte de luz	Lâmpada de xénon pulsada (com filtro de corte UV)
Tempo de medição	Aproximadamente 1 segundo
Intervalo de medição mínimo	MAV: Ø8 mm
Dados exibidos	Valores/gráficos espectrais
Espaços de cores	L*a*b*

Existem vários sistemas de representação de cor, e o equipamento utilizado registra as medições no espaço de cor CIE ou CIELAB (figura 22) sendo seguidamente efetuada a conversão para o sistema de cores RGB (*Red, Green, Blue*) (figura 23), de maneira a obter um termo de comparação com os dados obtidos pela classificação no QGIS.

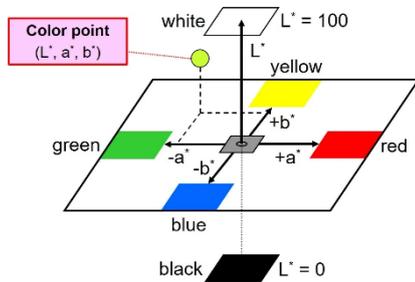


Figura 22: Sistema de cor CIELAB

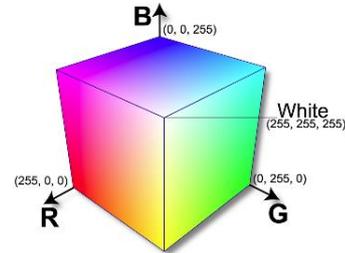


Figura 23: Sistema de cor RGB

Atendendo a informações de referências anteriores (Duarte, 2018) e ao trabalho de campo realizado no qual se identificou a sequência geológica dos vários tipos de calcário (figura 24) e o seu desenvolvimento horizontal dentro da unidade dos *Calcários Moleanos* (figura 25), foi possível proceder à verificação da eficiência da classificação.

As camadas encontram-se horizontais a subhorizontais (pendor 8° NE) e aproximadamente paralelas entre si, com uma orientação NO-SE.



Figura 24: Sequência do material calcário identificado na pedreira EM&R.

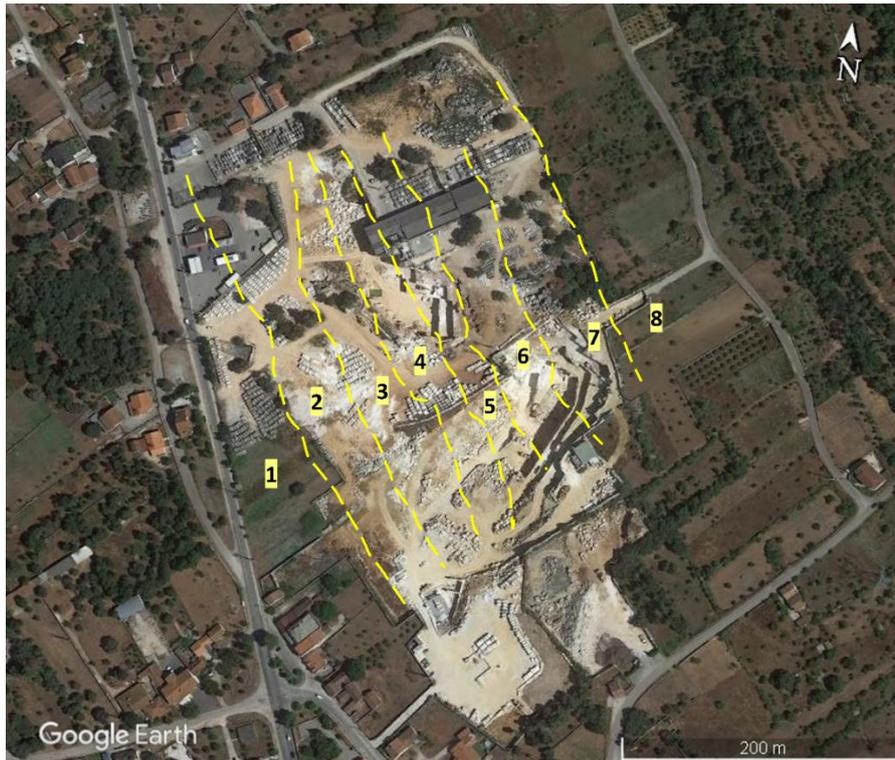


Figura 25: Imagem das pedreiras em estudo com a informação dos tipos de calcário aflorantes (Google Earth)

As medições de refletância foram realizadas em amostras recolhidas previamente, que representam os 8 diferentes tipos de calcário que afloram nas pedreiras em estudo (figura 26), distinguíveis pela granulometria, cor e compactação na sequência deposicional (da base para o topo)².

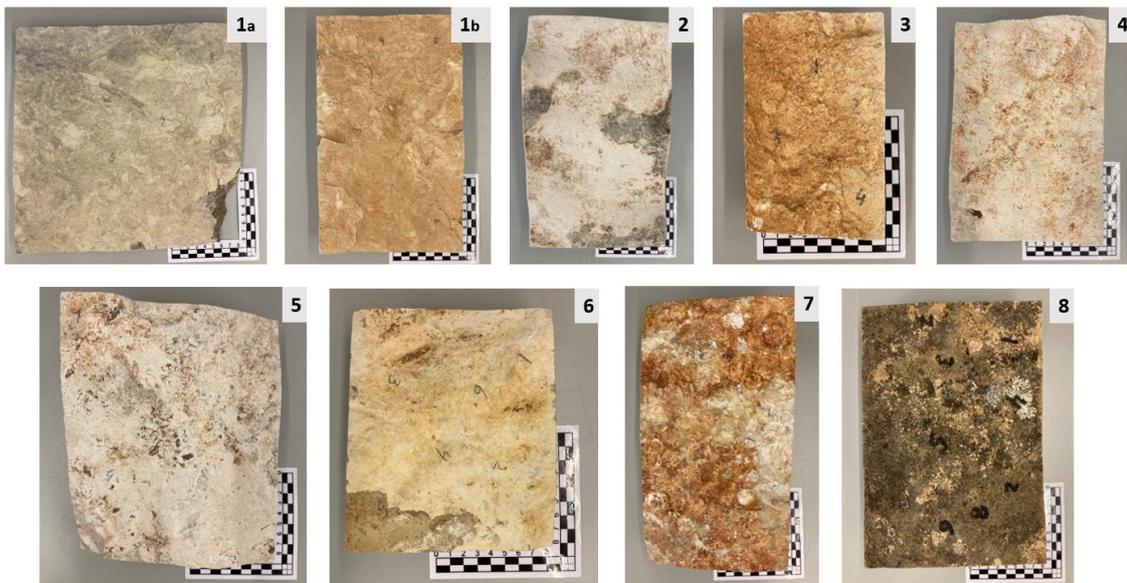


Figura 26: Amostras de rocha recolhidas *in situ* (1 a 8).

² A recolha das amostras de calcário foi efetuada anteriormente à presente dissertação, e por isso os locais de onde foram retiradas as amostras já foram explorados e recuperados, daí o fato de não ser apresentado um mapa de locais de recolha das mesmas.

Legenda da figura 26:

- Calcário **1a e 1b**: Calcário Vidraço.
- Calcário **2**: Calcário oolítico com estratificação entrecruzada com grão fino
- Calcário **3**: Calcário oolítico com estratificação entrecruzada com grão grosseiro.
- Calcário **4**: Calcário oolítico com grão grosseiro.
- Calcário **5**: Calcário Bioclástico (Recifal)
- Calcário **6**: Calcário oolítico de grão + fino
- Calcário **7**: Calcário “pedra bicho” ou Sardão.
- Calcário **8**: Calcário ferruginoso.

Efetuada as medições de cor no espaço CIE $L^* a^* b^*$, foi possível definir os valores de refletância dos diferentes calcários, nas quais a Banda 1 (B1) corresponde ao canal do azul ou comprimento de onda da cor azul, a Banda 2 (B2) ao canal verde e a Banda 3 (B3) ao canal vermelho.

Capítulo 5 - Análise e Discussão de Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos diferentes ortofotomapas com a aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior.

5.1 Fotointerpretação de Ortofotomapas

Os resultados dos vários modelos apresentam-se nas figuras 27 a 31 e nas figuras A3 até A11, no anexo.

Após o processamento das imagens, relativamente aos voos realizados no dia 4 de abril de 2022, foi possível constatar que, o modelo gerado com as fotografias do voo das 10:00 dia 4, comparativamente ao das 12:00 apresenta tons mais escuros, na sua generalidade.

Existem vários fatores que contribuíram para este fato, nomeadamente a hora solar, o que influencia a incidência da radiação no alvo, mas também devido ao acerto manual das configurações da câmara (ISO e a abertura da câmara) efetuado com o objetivo de não “queimar” a parte mais clara da imagem (parte da pedreira), relativamente à parte mais escura (vegetação).

Para além das diferenças na tonalidade da imagem, é possível observar que o voo das 10:00 do dia 4 de abril comparativamente ao do 12:00, apresenta uma maior quantidade de sombras na área da pedreira. É possível observar este fato nas figuras 27 e 28, recortes da área da pedreira para evidenciar a quantidade de sombra gerada, relativamente à hora de obtenção das fotografias.

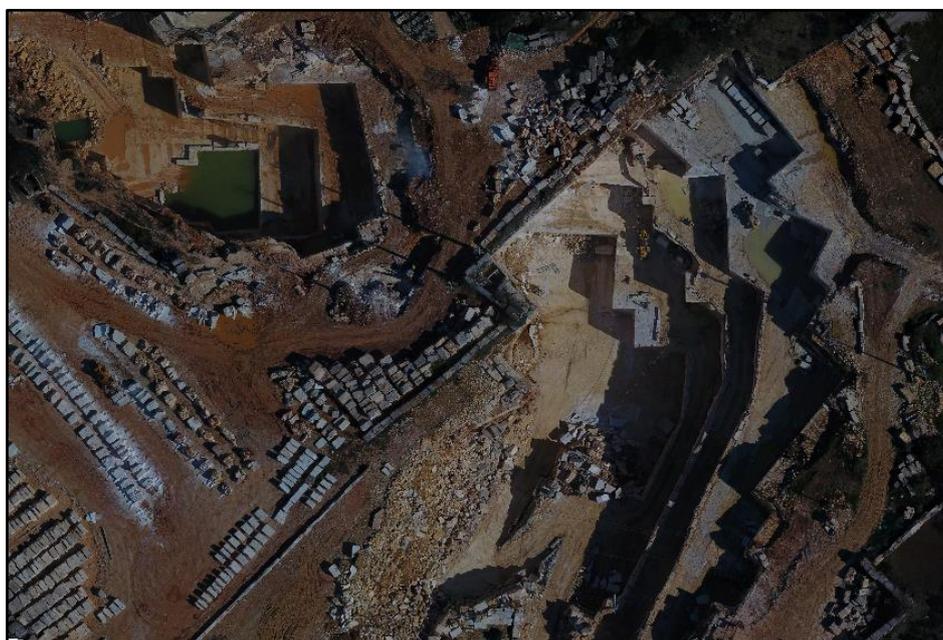


Figura 27: Recorte da área da pedreira do dia 04/04/2022 10:00

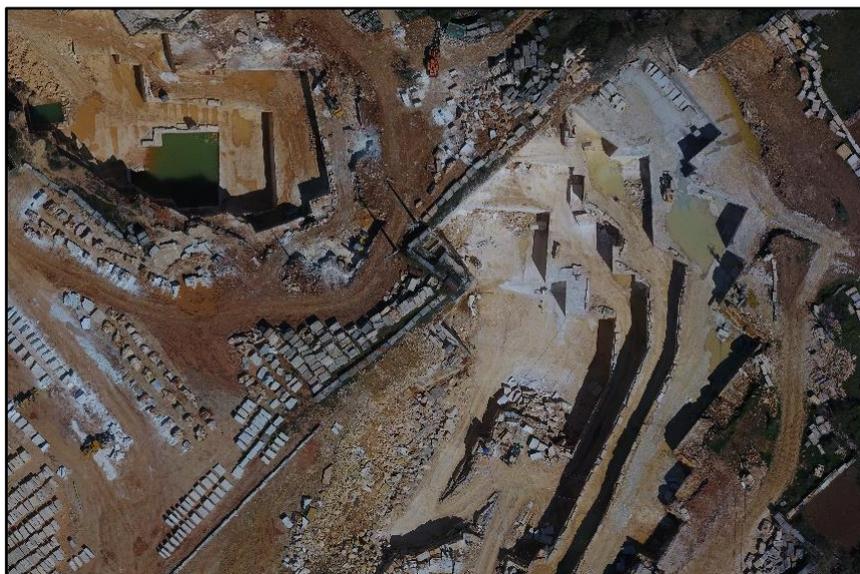


Figura 28: Recorte da área da pedreira do dia 04/04/2022 12:00.

O modelo gerado no dia 4 de abril de 2022 12:00, foi editado com o programa *GIMP* (figura 29), com o objetivo de tornar a imagem mais clara e nítida, facilitando assim a distinção entre os vários tipos de calcário. A configuração aplicada na imagem é efetuada de forma automática pelo programa, contudo tem de ser aplicada a cada uma das fotografias de modo separado (Coelho, 2019).

Embora fosse útil fazer a classificação numa imagem editada, na qual a identificação de calcário é mais facilitada, esta está manipulada e resultará em diferentes assinaturas espectrais dos materiais, deixando de existir um termo de comparação real. Desta maneira, embora a manipulação e realce das imagens, possa auxiliar na visualização de certas características no modelo ou ortofotomapa gerado, quando a finalidade do trabalho é a classificação com base na cor, este não pode ser utilizado.



Figura 29: Recorte da área da pedreira do dia 04/04/2022 12:00, editada com *GIMP*.

O modelo gerado com base no levantamento fotográfico do dia 27 de maio de 2022, pelas 10:00 (figura 30) apresenta-se com tonalidade mais clara relativamente aos voos do dia 4 de abril, devido, mais uma vez, às configurações da câmara definidas manualmente, nomeadamente o ISO e a abertura da câmara estabelecidos para as condições de luminosidade verificadas nesse dia.



Figura 30: Recorte da área da pedreira do dia 27/05/2022

Para além dos modelos mencionados anteriormente, foi efetuado um levantamento aerofotográfico no dia 17 de março de 2022 (figura 31), no qual se registaram condições atmosféricas que após comparação permitiram identificar as condições “ideais” para obtenção de um modelo sem influência de sombras. A presença de uma pluma de poeiras vindas de África a atravessar na atmosfera terrestre agiu como um filtro, fazendo com que a luz solar se comportasse como uma luz difusa (uma luz mais suave que é espalhada em todas as direções), levando a uma redução da influência das sombras ou tornando-as menos pronunciadas, como se observa neste modelo. No dia anterior ao levantamento choveu bastante, daí toda a zona da pedreira se apresentar coberta de água, o que também altera a resposta espectral dos materiais terrestres.



Figura 31: Recorte da área da pedreira do dia 17/03/2022

De maneira a evitar problemas associados às sombras, é possível consultar *on-line* a informação relativa ao horário do pico do sol num local específico, permitindo determinar qual a melhor hora para efetuar o levantamento, evitando ao máximo a influência da sombra, como por exemplo a aplicação *Sun Locator*. Este horário de pico é variável e tem em conta: a posição geográfica na terra (latitude, longitude), a inclinação da terra em relação ao sol (estação do ano), a data e a hora. Sabendo este horário é possível definir uma janela de voo de aproximadamente 4 horas para esse dia, ou seja, o período mais viável para realizar o mapeamento aéreo.

Com o objetivo de verificar as variações que a escolha dos parâmetros da qualidade do processamento (baixo, médio, elevado) no processo de construção do modelo fotogramétrico no programa *Agisoft Metashape*, têm no modelo final, realizou-se o presente teste, no qual foram processados 3 modelos, todos com as mesmas fotografias do dia 04/04/2022 pelas 12:00, mas com os parâmetros distintos.

A tabela 11 apresenta os diferentes parâmetros de processamento dos 3 modelos de maneira a facilitar a visualização dos resultados.

Tabela 11 – Parâmetros de processamento para os modelos, com as definições baixas, médias e altas.

Parâmetros de processamento	04/04/2022 12:00 baixo	04/04/2022 12:00 médio	04/04/2022 12:00 elevado
<i>Tie Points</i>	24 420	78 847	87 053
Nuvem de pontos da <i>dense cloud</i>	2 708 865	11 156 507	44 154 399
<i>Mesh</i> . vértices	30 522	372 613	4 380 347
<i>Mesh</i> – faces	59 755	740 541	8 740 631
Resolução do MDE	27,2 cm/ <i>pix</i>	13,9 cm/ <i>pix</i>	6,98cm/ <i>pix</i>
Densidade de pontos do MDE	13 <i>points/m</i> ²	51,5 <i>points/m</i> ²	205 <i>points/m</i> ²
Tempo total de processamento	204 segundos ou 3,4 minutos	548 segundos ou 9,13 minutos	2221 segundos ou 37,07 minutos

Com base nos ortofotomapas e nos parâmetros apresentados na tabela 11, é possível concluir que a alteração da qualidade do modelo, vai interferir numa questão estrutural, isto é, as diferenças nos modelos gerados vão ser essencialmente na quantidade de *Tie points* (pontos na imagem digital ou fotografia aérea que representam a mesma localização numa imagem ou fotografia adjacente).

Assim, depois de analisados os produtos gerados, verificou-se que as diferenças no ortofotomapa são mínimas, embora existam, e constam essencialmente em pequenas distorções ou arrastamentos dos píxeis nas imagens. Existem também algumas variações na resolução e densidade de pontos do MDE (tabela 11), que condicionaram automaticamente a projeção do modelo 3D.

Dito isto, e tendo em conta que no caso de aplicação estamos a trabalhar com a representação 3D no plano ou representação gráfica 2,5 D, será de esperar que o resultado não seja afetado do ponto de vista planimétrico (do ortofotomapa), mas para comprovar este fato, foi realizada a classificação nestes 3 modelos teste, para verificar se efetivamente existiam diferenças significativas nos mapas de classificação temática, realizados no *QGIS*.

5.2 Classificação Automática:

Depois de efetuada a classificação do ortofotomapa dos 3 modelos com o plugin SCP, os resultados são apresentados na figura 32.

Nas classificações realizadas, pretendia-se aplicar o conjunto ou entrada de treino (*training input*) definido para o primeiro modelo classificado, nomeadamente o do voo 04/04/2022 pelas 12:00 aos restantes modelos, de maneira a manter uma variante estática ou sem grandes alterações. Contudo isto não foi possível devido ao fato dos levantamentos terem sido realizados em condições, dias e horas diferentes, dificultando a transposição das ROI's para os restantes mapas, tornando necessária a adaptação das entradas de treino para as condições verificadas.

No modelo do 04/04/2022 pelas 10:00, esses ajustes foram realizados somente de maneira a remover a área a sombreado das ROI's, contudo no caso do modelo do 27/05/22, foi necessária a criação de uma nova classe, nomeadamente a classe de solo de mistura, que substitui a classe de solo molhado, visto que não existia uma representatividade suficiente da mesma para a classificar como existia no modelo anterior.

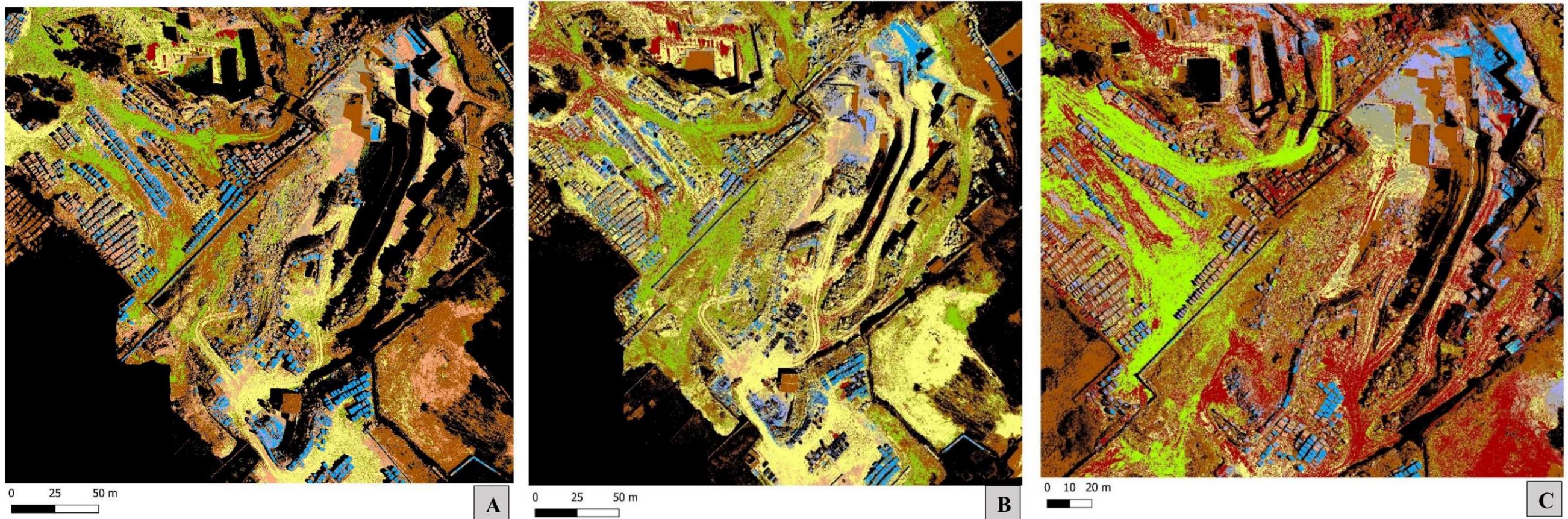


Figura 32: Mapa temático cobertura da terra resultante da classificação automática para o voo 04/04/2022 10:00, à escala 1:1500 (A), 04/04/2022 12:00, à escala 1:1550 (B) 27/05/2022, à escala 1:1200 (C).

Legenda da figura 32A e 32B:

- 0 - Unclassified
- 1 - calcario A
- 2 - calcario B
- 3 - calcario C
- 4 - calcario D
- 5 - solo organico
- 6 - solo cobertura seco
- 7 - solo cobertura molhado com agua
- 8 - solo cobertura molhado

Legenda da figura 32C:

- 0 - Unclassified
- 1 - calcario A
- 2 - calcario B
- 3 - calcario C
- 4 - calcario D
- 5 - solo organico
- 6 - solo cobertura seco
- 7 - solo cobertura molhado com agua
- 8 - solo mistura

5.2.1 Dados de classificação

Obtidos os mapas temáticos resultantes da classificação supervisionada, foi efetuada uma análise global de cada mapa gerado (figura 32) e efetuada uma média de todas as ROI's coletadas para cada classe de interesse com os valores de refletância mínimos e máximos obtidos (representando o desvio padrão) nas 3 bandas disponíveis, e obteve-se um resultado gráfico com o comportamento espectral das classes de interesse.

A análise foi realizada para todos os modelos classificados, mas utilizou-se como modelo exemplificativo as informações e dados do dia 04/04/2022 10:00 (tabelas 12 e 13 e figura 13), sendo que as informações dos restantes modelos se encontram nas figuras A12 a A17 e nas tabelas A1 a A4, nos anexos.

Tabela 12: Valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada, no ortofotomapa do dia 04/04/2022 10:00.

MC Nome	Cor da classe	B1 min	B1 máx	B2 min	B2 máx	B3 min	B3 máx
calcário A		94	121	106	133	118	147
calcário B		126	147	136	157	148	170
calcário C		92	137	85	131	76	125
calcário D		81	132	73	125	64	118
solo orgânico		43	120	27	107	21	102
solo cobertura seco		82	116	64	100	44	84
solo cobertura molhado com água		100	115	63	79	30	46
solo cobertura molhado		61	116	32	85	12	64

Tabela 13: Valores de refletância média no ortofotomapa do dia 04/04/2022 10:00, para cada classe mapeada e atribuição da composição RGB à cor correspondente.

MC Nome	B1	B2	B3	RGB
calcário A	108	119	133	
calcário B	136	146	159	
calcário C	114	108	100	
calcário D	106	99	91	
solo orgânico	82	67	62	
solo cobertura seco	99	82	64	
solo cobertura molhado com água	108	71	38	
solo cobertura molhado	89	59	38	

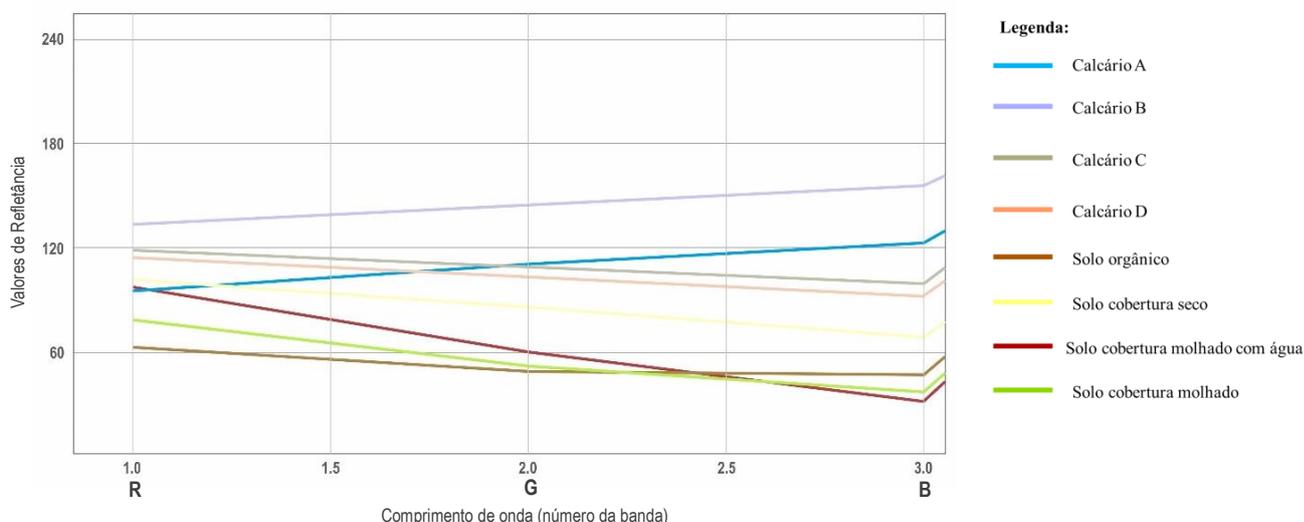


Figura 33: Comportamento espectral (refletância) das classes mapeadas nas 3 bandas disponíveis para o voo 04/04/2022 10:00, onde consta o valor da refletância (0-255) versus comprimento de onda (número da banda)

5.2.2 Validação de resultados

Para além da análise dos mapas foi necessário realizar a validação dos resultados obtidos, e para isso foi criado um ficheiro com as áreas de validação, no qual foi analisada a matriz de confusão, na opção “*output*”. A informação que consta nesta encontra-se organizada por colunas e linhas, nas quais as colunas representam a imagem de referência (*Groud Truthing*) e as linhas representam os resultados da nossa classificação (tabelas 14, 15 e 16). O PA refere-se ao *Producer Accuracy*, ou exatidão do fabricante, a UA *user’s accuracy* refere-se à exatidão do utilizador e o *overall accuracy*, à exatidão global.

Para a realização da validação dos resultados optou-se por diminuir a área de análise com um recorte da área mapeada, de maneira que nesta constasse somente as classes de interesse da imagem, numa tentativa de diminuir o erro associado à classificação das restantes classes presentes na imagem que não foram consideradas no conjunto de treino.

Tabela 14: Matriz de erro baseado na contagem de *píxeis* da imagem 04/04/2022 pelas 10:00.

> Matriz de erro (contagem de píxeis) do 4/4/22 10:00										
Classes classificadas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0	0	24	12	0	0	328	0	0	3	367
1	0	1317	1496	0	0	0	0	0	0	2813
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	8	4	209	0	0	0	0	221
4	0	23	130	157	114	0	26	0	0	450
5	0	11	21	8	0	4443	0	0	67	4550
6	0	0	0	32	0	1	779	0	20	832
7	0	0	0	0	0	0	16	1581	19	1616
8	0	0	1	0	0	623	39	146	1268	2077
Total	0	1375	1668	201	323	5395	860	1727	1377	12926
PA [%]	nan	24.4657	0.0000	1.4005	46.8224	32.7769	92.0915	67.9597	82.6691	
UA [%]	0.0000	46.8183	nan	1.8100	25.3333	97.6484	93.6298	97.8342	61.0496	
Kappa	0.0000	0.4420	nan	-0.0205	0.2123	0.9341	0.9301	0.9780	0.5888	
Overall accuracy (%)	38.3306									
Kappa classification	0.2677									

Tabela 15: Matriz de erro baseado na contagem de *píxeis* da imagem 04/04/2022 pelas 12:00.

> Matriz de erro (contagem de píxeis) do 4/4/22 12:00										
Classes classificadas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1271	115	0	0	0	0	0	0	1386
2	0	75	1503	4	0	0	0	0	0	1582
3	0	0	0	123	15	0	15	0	0	153
4	0	0	0	40	92	0	43	0	0	175
5	0	0	0	0	0	5238	0	0	49	5287
6	0	0	0	1	94	0	2282	0	9	2386
7	0	0	0	0	0	0	121	1653	37	1811
8	0	0	0	0	0	32	0	44	1454	1530
Total	0	1346	1618	168	201	5270	2461	1697	1549	14310
PA [%]	nan	94.0353	93.3551	79.3988	58.4303	98.2160	92.7745	93.9522	97.2865	
UA [%]	nan	91.7027	95.0063	80.3922	52.5714	99.0732	95.6412	91.2755	95.0327	
Kappa	nan	0.9153	0.9487	0.7965	0.5117	0.9889	0.9440	0.9065	0.9424	
Overall accuracy (%)	65.3993									
Kappa classification	0.6147									

Tabela 16: Matriz de erro baseado na contagem de *píxeis* da imagem 27/05/2022.

> Matriz de erro (contagem de píxeis) do 27/05/22										
Classes classificadas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	568	0	0	0	0	0	0	0	568
2	0	60	400	11	85	0	0	0	0	556
3	0	0	138	177	50	0	1	0	0	366
4	0	2	0	10	301	0	0	0	0	313
5	0	0	0	0	0	1309	0	0	39	1348
6	0	0	0	1	0	0	1412	0	4	1417
7	0	0	0	8	0	2	2	1239	38	1289
8	0	0	0	0	0	48	0	269	3757	4074
Total	0	630	538	207	436	1359	1415	1508	3838	9931
PA [%]	nan	88.7813	42.7199	90.9185	72.1739	99.2893	99.0748	95.7288	89.7396	
UA [%]	nan	100.0000	71.9424	48.3607	96.1661	97.1068	99.6471	96.1210	92.2189	
Kappa	nan	1.0000	0.7086	0.4676	0.9601	0.9603	0.9963	0.9509	0.9096	
Overall accuracy [%]	73.9286									
Kappa classification	0.6951									

5.2.3 Discussão

A discussão de resultados de todos os mapas, foi focada essencialmente nas classes de calcário.

Relativamente ao ortofotomapa classificado do 04/04/2022 pelas 10:00 foi possível observar os seguintes resultados (tabela 14 e figura 32A):

- O índice de *overall accuracy* (%) ou exatidão geral (média da precisão da classificação) teve uma percentagem de 38% dos *píxeis* bem classificados e o *Kappa classification* (índice *kappa*) possui um valor de 0,26 (de 0-1), que segundo a tabela 9, significa que apresenta uma concordância ligeira.

- Analisando a tabela 14, pode observar-se que a classe que apresenta um maior erro associado é a classe 2 (calcário B), visto que ao cruzar a classe 2 da classificação com a classe 2 dos valores de realidade do terreno (áreas de validação), existe um total de 0 *píxeis* corretamente classificados, encontrando-se erroneamente atribuídos a outras classes.

- Analisando o mapa gerado (figura 32A), foi possível constatar que os locais onde se coletou as ROI's representativas da classe B, foram classificados como calcário A, devido à semelhança espectral existente entre classes, que causou problemas na diferenciação destas.

- Para além da classe 2, a classe 3 (calcário C) foi das classes que apresentou mais problemas na classificação, resultando numa PA de 1,4% e numa UA de 1,81% (tabela 14), possivelmente pelos mesmos motivos, sendo que esta classe apresenta uma grande semelhança espectral com a classe 4 (calcário D).

Assim, tendo em conta os resultados da validação e os gráficos e tabelas com os valores de refletância por comprimento de onda, podemos concluir que para o modelo 04/04/2022 realizado às 10:00, grande parte das classes de interesse teve problemas na classificação, nomeadamente as classes 1, 2, 3 e 4. Isto pode dever-se ao fato de não existir uma boa discriminação espectral entre estas classes, justificando a importância de verificar as distâncias espectrais entre as classes,

durante o processo de classificação e também devido às condições de obtenção das fotografias, que acabaram por condicionar o resultado obtido.

Para o ortofotomapa de 04/04/22 às 12:00 (figura 32B), a exatidão geral atingiu uma percentagem de 65% e o índice *Kappa* possui um valor de 0,61, que segundo a tabela 9, significa que apresenta uma concordância classificada como boa e foram apresentados os seguintes resultados (tabela 15):

- Analisando a tabela 15, relativa à matriz de erro do mapa do dia 04/04/2022 12:00, a classe que gerou mais problemas do ponto de vista da classificação foi a classe 4 (calcário D) com o *Kappa* mais reduzido (0,551) e apresenta uma PA de 58% e UA de 53%.

- Neste caso, a identificação do calcário A (classe 1) e B (classe 2) foi efetuada corretamente nos locais de recolha das ROI's, nomeadamente na pedreira da Lagoa nº 6720, e estas classes encontram-se bem classificadas na imagem, resultando assim numa PA de 94% e 93% e UA de 92% e 95%, respetivamente, para essas classes.

- Relativamente à classe 3 (calcário C) e classe 4 (calcário D), identificadas na pedreira EM&R, embora tenham sido classificadas nos locais de recolha das ROI's apresentam-se representadas num espaço muito limitado devido à cobertura das bancadas com solo, pó e lamas que acabam por limitar a visualização da rocha (figura 32B), tornando mais difícil a melhoria da pureza destas classes, e gerando uma maior confusão nas assinaturas, resultando numa PA de 79% e 58% e UA de 80% e 52%, respetivamente.

Uma vez realizados os voos do dia 04/04/2022, foi possível observar que o fato de as bancadas da pedreira se encontrarem cobertas de solo orgânico, de cobertura etc., apresentava uma limitação à classificação. Assim, com o objetivo de melhorar a visualização dos calcários, foi efetuada uma limpeza nas bancadas que apresentavam maior cobertura de material indesejado.

Na classificação do modelo 27/05/2022, também foi necessário adaptar a entrada de treino, visto que se trata de uma pedreira ativa e as áreas anteriormente recolhidas, já não correspondem ao mesmo alvo na imagem originalmente classificada. Para além disso, na classificação deste dia, foi criada uma classe, o solo mistura, que substitui a classe de solo cobertura molhado.

Para o ortofotomapa de 27/05/2022 (figura 32C), a exatidão global da imagem atingiu uma percentagem de 74% e o índice *Kappa* possui um valor de 0,69, que segundo a tabela 9, significa que apresenta uma concordância classificada como boa (tabela 16).

Neste caso, a identificação dos calcários foi bastante satisfatória, sendo que o calcário A (classe 1) foi corretamente identificado no local onde se realizou a recolha das ROI's, nomeadamente na pedreira da Lagoa nº6720, apresentando uma maior área devido à limpeza das superfícies, atingindo uma PA de 89% e uma UA de 100% (figura 32C). O calcário B (classe 2), embora também tenha sido bem classificado nos locais de recolha, apresenta uma maior confusão com a classe 3 (calcário C) (tabela 16), resultando numa PA de 42% e UA de 71% para a classe 2, e numa PA de 90% e UA de 48%, para a classe 3. A classe 4 (calcário D), apresenta uma PA de 72% e UA de 96% e causa um equívoco com as classes 2 e 3.

Embora os valores de exatidão sejam mais elevados no modelo 27/05/2022, estes podem apresentar erros associados se as classes espectrais apresentarem comportamentos espectrais muito

semelhantes, como é o caso. Assim, embora a limpeza das bancadas na zona extrativa tenha ajudado a identificar rocha calcária, continua a existir um equívoco entre os diferentes tipos calcários classificados na imagem.

No dia anterior ao levantamento aerofotográfico do dia 17 de março, tinha chovido no local e por isso, a resposta espectral dos materiais foi alterada, fazendo com que a refletância dos materiais fosse menor comparativamente aquando está seco. Por isso, e por constrangimentos de tempo não se efetuou a classificação do modelo do dia 17/03, contudo seria de esperar que o resultado, relativamente à questão das sombras, fosse bastante melhor.

5.2.4 Discussão entre modelos classificados

O fato dos modelos do dia 04/04/2022 pelas 10:00 e 12:00 terem sido realizados no mesmo dia, mas em horas diferentes e terem gerado resultados tão diferentes, permitiu demonstrar o quão importante é a definição de uma janela de voo antes de efetuar o levantamento fotográfico. Assim, o mapa 04/04/2022 12:00, comparativamente ao das 10:00, apresenta uma menor influência de sombras, gerando melhores resultados, como seria de esperar.

Uma vez analisados os vários resultados da classificação, foi possível concluir que o mapa do dia 27/05/2022 foi o que apresentou uma exatidão global melhor de todos os mapas temáticos, e à semelhança do mapa 04/04/2022 pelas 12:00, a classe que apresenta um erro maior e um *Kappa* menor, é a classe 3 (calcário C).

Verificou-se uma maior confusão entre as assinaturas espectrais das ROI's recolhidas, no dia 04/04/2022 10:00, comparativamente às do dia 04/04/2022 12:00 e 27/05/2022, e isso pode dever-se a vários fatores como a sombra, a limpeza das superfícies, a atribuição dos ROI's etc.

Tendo em conta os vários modelos e as assinaturas espectrais geradas a partir de cada classificação, tornou-se possível a identificação da banda que permite uma melhor discriminação das assinaturas espectrais dos calcários em todos os mapas gerados (figura 33 e figuras A19 e A21, nos anexos), nomeadamente a banda 3, na qual os valores de refletância têm uma maior variação/diferença.

No caso dos solos amostrados (classes 5, 6, 7 e 8), as bandas que permitem a melhor diferenciação é a banda 1 para a imagem do dia 04/04/2022 (os dois voos) e a banda 2 para a imagem do dia 27/05/2022, contudo estes materiais não apresentam tantos problemas visto que possuem assinaturas espectrais distintas entre si.

Algo que é comum às classificações com resultados mais fidedignos, nomeadamente 04/04/2022 12:00 e 27/05/2022, e que está inerente à classificação, é a semelhança espectral existente entre classes de calcário, nomeadamente da classe 1 (calcário A) com a classe 2 (calcário B), e da classe 3 (calcário C) com a classe 4 (calcário B), levando a um equívoco na identificação destes materiais no mapa de classificação gerado (tabela 17).

Durante a recolha dos polígonos de amostragem (ROI's) foi possível observar que existia uma diferença na resposta espectral das amostras recolhidas em afloramento comparativamente à dos blocos desmontados do mesmo calcário, devido à influência da sombra e outros fatores que

condicionam e alteram a resposta espectral, o que apresentará logo à partida uma limitação, visto que existe variações nos valores, dentro do mesmo tipo de calcário.

Tabela 17: Compilação das composições RGB (cor) para as diferentes classes de interesse das imagens classificadas.

MC Nome	RGB (4/4 10:00)	RGB (4/4 12:00)	RGB (27/5)
calcário A			
calcário B			
calcário C			
calcário D			
solo orgânico			
solo cobertura seco			
solo cobertura molhado com água			
solo cobertura molhado			-
solo mistura	-	-	

Por vezes, como no caso em estudo, esta diferenciação entre litologias pode ser mais complicada devido às limitações visuais na imagem que não podem ser ultrapassadas, como o fato de grande parte da pedra se encontrar coberta com solo e pó de pedra entre outros materiais, que condicionaram bastante o resultado.

Será de esperar que quantas mais classes existirem na classificação, melhor será o resultado da mesma, contudo também existirá uma maior probabilidade de objetos com cores iguais ou semelhantes, serem classificados com classes erradas, mas isso é um erro que está inerente à classificação visto que está depende somente da colorimetria.

Assim sendo, nem sempre é possível atingir a classificação ideal ou mais satisfatória e isso depende muito do número de bandas que o sensor em utilização dispõe, visto as faixas do NIR e SWIR permitem evidenciar certos aspetos, que as camaras fotográficas RGB não conseguem.

5.2.5 Correlação da cartografia de campo com os resultados da classificação

Com o objetivo de verificar se existia uma correlação dos dados da cartografia de campo (adaptado de Duarte, 2018) com o resultado do processo de classificação das litologias, foi efetuada uma sobreposição dos dois mapas (figura 34). Essa correlação foi efetuada para o mapa com um melhor desempenho, que segundo os dados de validação, é o mapa do dia 27/05/2022.



Figura 34: Sobreposição da cartografia de campo com os resultados da classificação supervisionada para o dia 27/05/2022.

Tendo em conta a cartografia efetuada à superfície que considera as litologias aflorantes (figura 25), foi possível observar que a classe de calcário A foi corretamente identificada nos locais onde se efetuou a atribuição das ROI's (figura 20A), e que a classificação está de acordo com a cartografia de campo, correspondendo efetivamente ao calcário Sardão (calcário 7, figura 26), e o contacto entre este e o calcário 8 (calcário ferruginoso) encontra-se bem definido.

Para além do calcário A que se encontra à superfície (calcário Sardão), permitindo uma correlação direta entre a cartografia de campo e a da classificação, não é possível efetuar este tipo de relação com os restantes calcários visto que existem materiais diferentes a cotas diferentes. Assim, para realizar a análise dos resultados é importante ter em conta a altimetria do terreno no qual se verificam cotas superiores na zona do calcário 8 (calcário ferruginoso) e que essa cota diminui significativamente na zona de exploração, como seria de esperar.

Relativamente ao calcário identificado à superfície na pedra EM&R, segundo a cartografia de campo, dentro do limite do calcário 6 (calcário oolítico de grão + fino) e 7 (calcário Sardão), é possível observar que as tonalidades neste local são mais azuladas o que pode significar que o calcário que aqui se identifica localmente, pode ter uma resposta espectral semelhante à do calcário A (calcário Sardão), identificado a azul. Dentro desse mesmo limite, mas na pedra Lagoa nº 6720, a litologia identificada já não foi a mesma, visto que se trata de cotas diferentes, correspondendo a materiais geológicos diferentes, contudo verifica-se uma transição entre os dois calcários bem marcada na zona de contacto (identificada a cinza/castanho-claro e a roxo-claro).

O calcário C que corresponde ao calcário 2 (calcário oolítico com estratificação entrecruzada com grão fino) e o calcário D que corresponde ao calcário 4 (calcário oolítico grão grosseiro) são bastante semelhantes espectralmente (tabela 19) e no mapa da classificação do dia 27/05/2022 apresentaram-se constantemente misturados entre si, e até aos restantes calcários identificados (figura 34). Uma vez que não é possível distinguir estes tipos calcários, o resultado da classificação na pedreira EM&R apresenta uma diversidade de cores que representam a mistura existente entre as assinaturas espectrais dos materiais, fazendo com que seja impossível uma correlação destes dados com a cartografia de campo.

Pode existir algum acidente estrutural na zona estudada que pode ter condicionado a disposição dos materiais geológicos. Desta maneira, é possível que a metodologia proposta constitua uma aplicação com resultados fidedignos, se aplicada em determinadas condições ou se for utilizada como metodologia complementar.

Para entender se a escolha da qualidade dos parâmetros tem influência no processo de classificação, foi realizada a classificação dos 3 modelos (baixo, médio, elevado) de teste, para o mesmo conjunto de fotografias, nomeadamente do 04/04/2022 pelas 12:00, e foi aplicada a mesma entrada de treino nas 3 classificações, de maneira que esta não consistisse num fator de variação.

Uma vez analisados os 3 mapas de cobertura, verificou-se que efetivamente os resultados obtidos não possuíam diferenças significativas na classificação final e foram depois efetuadas as validações dos resultados, nas quais se observou os valores percentuais de exatidão global da imagem, baixo (63%), médio (67%), elevado (65%), que comprovam este fato. Foi possível concluir, com base nos mapas gerados e nas percentagens de exatidão global da imagem, que as variações foram mínimas e não significativas, e por isso, poder-se-ia efetuar o processamento com os parâmetros de qualidade baixos ou médios, otimizando assim o tempo dispensado no processamento das imagens captadas no programa *Agisoft Metashape* e gerando ficheiros menos pesados, sendo que do ponto de vista planimétrico, o resultado seria o mesmo.

5.3 Correlação com a componente de colorimetria de amostra de mão

Depois de efetuada a avaliação da classificação, foi medida a refletância com o espectrofotómetro, e os valores convertidos em tabelas de dados, e em gráfico dos valores de refletância com as bandas que o sensor consegue discriminar (figura 35).

Efetuada as medições, foi possível definir os valores de refletância dos diferentes calcários obtidos com base na média das medições efetuadas nas amostras (tabela 18), nas quais a Banda 1 (B1) corresponde ao canal do azul, a Banda 2 (B2) ao canal verde ou ao comprimento de onda do verde e a Banda 3 (B3) canal vermelho.

Tabela 18: Valores médios de refletância das amostras de mão de litologia calcária.

Amostras de calcário:	R	G	B	Cor
1 creme	194	160	126	
1 azul	182	171	149	
2	207	191	171	
3	186	151	112	
4	212	189	163	
5	209	192	173	
6	206	180	143	
7	180	152	123	
8	123	109	90	

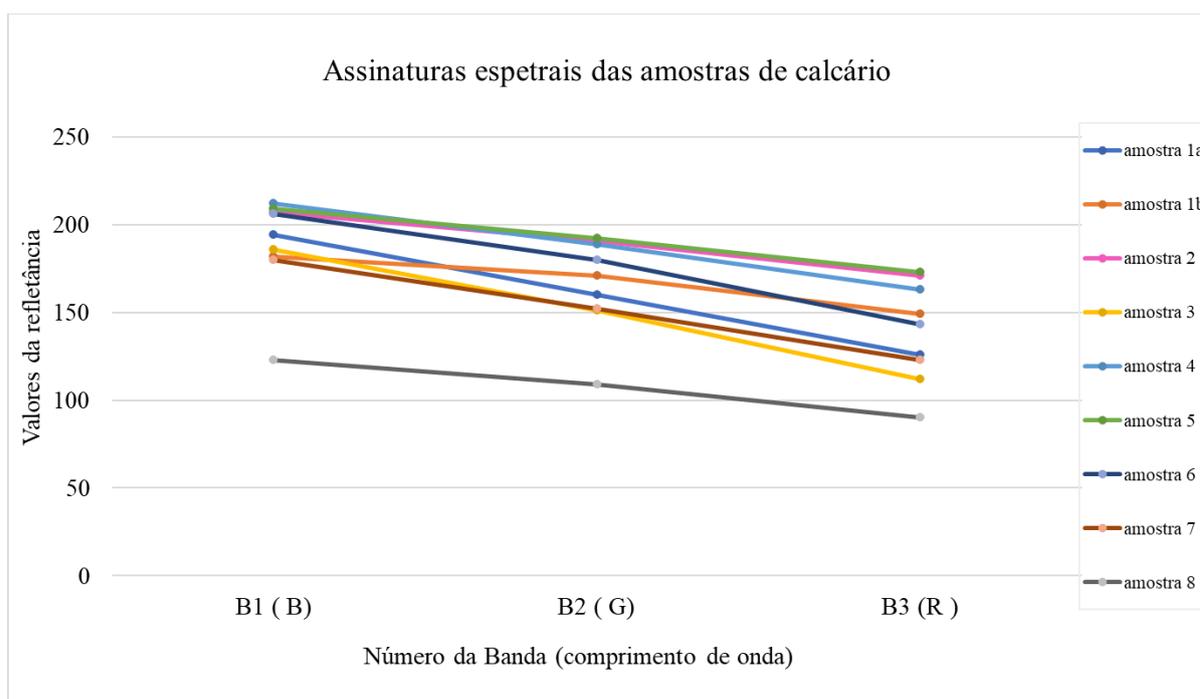


Figura 35: Gráfico com as assinaturas espectrais das amostras de calcário, medidas em laboratório com o espectrofotômetro modelo Konica Minolta CM-700D.

A tentativa de correlação da medida de refletância entre as amostras recolhidas e os valores obtidos a partir da classificação no *QGIS*, foi efetuada somente para as classes de calcário mapeadas, visto que existem calcários que não foram identificados no ortofotomapa devido ao fato de se tratar de uma imagem planimétrica.

Segundo a figura 35, entre todas as amostras de calcário, a maior semelhança a nível de cor é da amostra 2 (calcário oolítico com estratificação entrecruzada com grão fino), amostra 4 (calcário oolítico com grão grosseiro) e amostra 5 (calcário bioclástico), que são as amostras que apresentam uma maior refletividade. A amostra 7 (calcário “pedra bicho”) e a amostra 3 (calcário oolítico com estratificação entrecruzada com grão grosseiro), também apresentam uma resposta espectral bastante semelhante.

O comportamento espectral dos calcários 2 e 4 obtidos no *QGIS*, comparativamente aos comportamentos medidos em laboratório para as amostras da camada 2 e 4 são globalmente diferentes, mas a semelhança espectral entre ambas está presente quer na análise do *QGIS* quer nos dados laboratoriais sendo estas as classes mapeadas que geraram mais erros devido a esta semelhança.

A amostra 8 tem uma assinatura espectral distinta de todas as outras, apresentando tons mais escuros (tabela 18 e figura 35). É de notar que apesar deste calcário apresentar uma refletância baixa, a presença da cobertura de líquenes condiciona a resposta espectral do material rochoso (figura 26).

Embora se verifiquem algumas semelhanças entre as assinaturas espectrais medidas em laboratório com as obtidas no programa *QGIS*, não é possível fazer uma correlação direta, visto que os valores não são comparáveis.

Verifica-se que tendencialmente a refletância medida em condições controladas com o equipamento, permite obter valores de reflexão superiores, o que seria de esperar por não existirem tantas variáveis, ao contrário da refletância obtida na imagem classificada.

5.4 Limitações dos métodos e metodologias

Os métodos e metodologias seguidos no trabalho tiveram em conta algumas limitações associadas às condições existentes, nomeadamente a identificação litológica, baseada somente na interpretação de assinaturas espectrais lidas nos comprimentos de onda do visível, uma vez que são as únicas faixas espectrais que o sensor da câmara utilizada consegue discriminar. Esta condicionante limita o espectro de observação, e desta maneira, objetos diferentes ou homogêneos que se encontrem na superfície terrestre, podem ser classificados como tendo características espectrais semelhantes, devido à falta de características evidentes que os diferenciem (Wei, Liu & Liu, 2016).

Esta limitação, que está associada à resolução espectral do sensor, inclui somente a região do visível, restringue a análise efetuada apresentando uma limitação face aos dados obtidos com os sensores presentes nos satélites, que permitem a análise de mais intervalos espectrais (Pereira, 2019).

No caso das rochas calcárias, a espectralradiometria no *Short-wave infrared* (SWIR) é altamente eficiente na deteção e diferenciação dos carbonatos (Meneses & Almeida, 2019b), contudo este intervalo de comprimento de onda não estava disponível no equipamento utilizado.

Uma vez que a informação registada por um sensor de captação de imagem (câmara), é somente a da superfície do objeto, e que a REM não possui a capacidade de penetrar materiais sólidos, a presença de cobertura vegetal e solo de cobertura apresentam uma barreira de observação direta à litologia, o que se torna uma limitação para a classificação litológica (Meneses & Almeida, 2019a). Apesar destas limitações serem conhecidas, o trabalho desenvolveu-se com o equipamento de baixo custo disponível e em condições atmosféricas reais, nem sempre favoráveis.

Capítulo 6 - Considerações finais

6.1 Conclusões

A utilização de novas tecnologias nos métodos de prospeção permite adquirir dados e informações importantes à pessoa encarregue pela decisão, acerca da dispersão e desenvolvimento espacial das litologias existentes num determinado maciço rochoso, numa fase de lavra inicial ou ativa de prospeção, onde se pretende fazer a identificação de ocorrências geológicas antes da intervenção no meio.

Assim, tendo em conta as limitações associadas ao processo, este procedimento pode constituir uma ferramenta importante no apoio à decisão. A metodologia utilizada neste trabalho recorreu a vários métodos e técnicas na avaliação e caracterização geológica dos maciços rochosos carbonatados, aplicada a uma área de estudo localizada no concelho das Ourém, freguesia de Fátima, entre as localidades Currais e Boleiros.

Esta metodologia teve como grande objetivo a utilização de programas de código aberto para modelação e classificação, utilizando técnicas de classificação automática que proporcionassem uma forma mais rápida e económica de identificação litológica, através da utilização de um VANT que permitisse a aquisição de dados para identificação, caracterização e modelação de locais menos acessíveis, proporcionando uma maior cobertura de área em menos tempo, mas com qualidade. Embora os objetivos tenham sido concretizados, os resultados não foram os ideais, fornecendo, contudo, dados importantes que permitiram inferir procedimentos de otimização da metodologia.

A utilização do VANT no mapeamento aéreo implica apenas um operador/técnico no campo, responsável pela recolha de imagens e um técnico no gabinete responsável pelo descarregamento das imagens aéreas e pelo processamento dos dados, o que resulta numa diminuição dos custos associados a uma equipa de maior dimensão, além dos respetivos custos logísticos.

Quando se pretende realizar um levantamento aerofotográfico com a finalidade de mapeamento geológico, é extremamente importante definir previamente as condições de voo de modo a obter bons resultados, embora por vezes existam condicionantes difíceis de controlar, como as condições meteorológicas (temperatura, vento, nuvens), que tendem a ser bastante imprevisíveis e a vegetação que pode, por vezes, cobrir as litologias aflorantes, apresentando assim uma limitação à classificação, visto que condiciona a resposta espectral da cobertura.

Existem maneiras de diminuir ou evitar as consequências destes fatores, conhecendo a janela de voo, ou seja, o intervalo de tempo “ideal” para realizar a captação de fotografias aéreas, de maneira a evitar dificuldades e erros no posterior processamento digital das imagens, visto que a sombra influencia diretamente a qualidade do processamento, modificando a resposta espectral dos alvos.

Para além destes, existem outros fatores inerentes ao local, nomeadamente a poeira gerada com o processo de desmonte e corte das talhadas, as máquinas em funcionamento que por vezes também apresentam uma limitação visual e os detritos resultantes da exploração que estão na pedreira e que condicionarão o resultado obtido.

No mapeamento aéreo para análises quantitativas, onde são utilizados sensores RGB, com o objetivo de medir algo, as sombras das nuvens podem prejudicar, mas não são um fator crítico. Já em análises qualitativas, onde o objetivo é fazer análises espectrais, essas influências podem ser determinantes nos resultados (DroneEng, 2017b). Assim, sempre que possível, devemos escolher dias com o céu limpo ou totalmente coberto por nuvens (nublado, atuando como luz difusa), visto que o meio termo confunde o processamento.

Quando a finalidade do mapeamento aéreo em pedreiras é a parte tridimensional (modelo 3D), é importante que o voo seja efetuado tendo em conta a orientação das descontinuidades (preferencialmente perpendicular às estruturas), contudo no caso de estudo isso não era crucial, visto que se pretendia evidenciar somente a parte planimétrica.

As ferramentas disponíveis no programa *QGIS* apresentaram-se relativamente eficazes na classificação temática de pedreiras, apesar do algoritmo classificar algumas áreas erroneamente, principalmente na zona da exploração, visto que existe uma enorme diversidade de valores espectrais, que acabaram por causar confusões entre as assinaturas dos diferentes materiais.

Assim, quando existem problemas associados à diferenciação entre classes de interesse, é importante tentar melhorar a qualidade da assinatura espectral, com o objetivo de criar uma classificação mais rigorosa. Para isso, é necessário melhorar o conjunto de treino, aumentando o número de classes, tornando assim as assinaturas espectrais mais puras ou aumentando o número de ROI's para uma mesma classe, sendo que o número de *píxeis* de uma ROI deve ser maior, quanto maior for a abrangência e variabilidade interna de cada classe mapeada.

Para melhorar os resultados dos mapeamentos, nomeadamente os que possuam maior detalhe espacial, é vantajosa a utilização de uma base de dados multiespectrais com a melhor resolução espectral disponível. Para além disso, pode ser útil na distinção dentro do mesmo tipo litológico de uma grande resolução radiométrica, relacionada com o nível de sensibilidade do sensor em detetar pequenas variações, que ajudaria a fazer a diferenciação das tonalidades do calcário com maior facilidade.

A utilização das geotecnologias, revelou-se bastante importante na possibilidade de caracterização de locais com acesso limitado, pelo fato de permitir adquirir dados, processá-los e interpretá-los em gabinete, e possibilitando a sua visualização e desenvolvimento geológico nos modelos 2, 2,5 ou 3D, utilizando tecnologias de baixo custo. Com a utilização destas, foi possível concluir que é importante recorrer a outros dados ou métodos de forma complementar, como as cartas geológicas à escala local realizadas na área de estudo, de maneira a aumentar a probabilidade de sucesso na identificação de unidades geológicas, essenciais para avaliar as condições de explorabilidade do maciço rochoso assim como auxiliar o planeamento de extração com lavra ativa.

Assim sendo, sem informação de campo detalhada ou sem uma grande base de dados geológica, o método de classificação não é credível, resultando apenas numa boa técnica de complementação da cartografia.

Existem vantagens e desvantagens na utilização de levantamentos aerofotográficos em comparação com os levantamentos topográficos tradicionais. Assim, os levantamentos aerofotográficos possuem uma maior qualidade relativamente ao topográfico, em aspetos como o

tempo de aquisição de dados, a dependência humana no processo de aquisição, na produção e ortorectificação de mapas e na resolução da amostragem. Contudo, apresentam uma maior limitação relativamente aos topográficos na precisão do posicionamento, na limpeza da superfície (vegetação e artefactos indesejados) e no tempo de processamento de dados.

Em áreas maiores a produtividade da fotogrametria aumenta e da topografia diminui, isso porque na fotogrametria é possível mapear uma área maior aproveitando a autonomia do VANT e na topografia uma área maior demanda mais tempo no campo.

Em conclusão, o trabalho realizado obteve resultados significativos no que diz respeito à metodologia e métodos sugeridos para o contributo à caracterização de áreas com potencial para a extração de rochas ornamentais, contudo esses resultados provavelmente seriam melhores se se tratasse do mapeamento de uma grande área.

O desenvolvimento destas técnicas de investigação com aplicação prática, se corretamente aplicada, traduz-se numa medida lucrativa e no crescimento da própria empresa, uma vez que contribui para a diminuição dos custos associados ao processo de prospeção e exploração.

6.2 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros será importante realizar estudos mais exaustivos e completos que permitam fornecer dados importantes para um melhor desempenho das técnicas utilizadas.

É possível personalizar o VANT, adaptando-o a alcançar o objetivo pretendido com a utilização de câmaras multiespectrais e/ou hiper espectrais, que permitem a captação de dezenas de bandas com largura estreita, posicionadas em regiões específicas do espectro eletromagnético. As imagens multi e hiper espectrais geradas a partir desses sensores, no caso da geologia, podem fornecer informações relativas à composição dos materiais terrestres, podendo por vezes até alcançar o nível de identificação de alguns minerais específicos, resultando assim em medições muito mais precisas.

Poderia ser interessante testar outro tipo de classificadores de *Machine Learning* e *Deep Learning* de maneira a avaliar se o desempenho dos mesmos leva à obtenção de melhores resultados na classificação.

Um dos objetivos para trabalhos futuros é desenvolver a metodologia aplicada no presente trabalho, procedendo à seleção de pedreiras que ofereçam melhores condições de investigação, como superfícies mais limpas na área extrativa, de modo a obter resultados mais fidedignos e cientificamente relevantes.

Para além disso, seria pertinente aplicar a metodologia e métodos utilizados noutros locais, de maneira a avaliar os maciços, não só calcário, como graníticos ou outro tipo litológico, contribuindo para a sua validação como ferramenta de trabalho de prospeção.

Poderia ser interessante realizar o levantamento fotogramétrico e classificação supervisionada, na frente de escavação em vez de no afloramento de maneira a facilitar a observação das variações

entre os tipos de calcário existentes, contudo esta teria de ser realizada com uma maior frequência devido às constantes modificações que são resultado do avanço de exploração da pedreira.

A verificação da existência de possíveis correlações entre os solos superficiais de cobertura, com as litologias adjacentes, poderia também ser interessante para futuros trabalhos.

Por fim, teria relevância a extrapolação dos resultados obtidos para outros locais na região, que não tenham sido alvos de avaliação, de maneira a confirmar a validade do trabalho efetuado.

Referências Bibliográficas:

- Agisoft, L. L. C. (2022). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition*, v. 1.8
- Almeida F. C. & Ferreira D. A. C. (s.d.) Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto aplicado a Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas <http://dspace.agencia.gov.br:8080/conhecerhana/98>
- Alves, A. C. R. (2020). *Mapeamento das ocupações irregulares nas Apps do trecho urbano do Córrego Mumbuca em Monte Carmelo – MG*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Universidade Federal de Uberlândia. Repositório Institucional da UFU. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30799>
- Azerêdo, A. C. (1993). *Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica): análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia*. Dissertação de Doutorado apresentada à Universidade de Lisboa, Portugal.
- Azerêdo, A. C. (2007). Formalização da litoestratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicações Geológicas*, v.94, pp 29-51. <https://www.researchgate.net/publication/215577415>
- Batista, J. M. P. (2015). *Classificação Automática de Pedras de Mármore Polido*. (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Técnico de Lisboa). Repositório da Universidade de Lisboa. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/departamentos/dem/dissertacao/846778572210968>
- Bishop, C., Rivard, B., Filho, C. D., & Meer, F. V. (2018). Geological remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.64, pp. 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.005>
- Chuviecco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madri, España: 2 ed. Ediciones Rialp.
- Coelho, N. J. S. (2019). *Caracterização geotécnica e estrutural de um maciço de rochas carbonatadas com aplicação da técnica de fotogrametria - caso de estudo aplicado a uma pedreira de rocha industrial*. (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Geociências com especialização em Recursos Geológicos, Universidade de Coimbra). Repositório científico da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316/86706>
- Congalton, R.G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, n.1, p. 35-46.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Crósta, A. P. (1992). Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, SP: Instituto de Geociências/UNICAMP. In Costa & Freitas (Eds.), *Ambiente e Sociedade no Brasil* pp.114-121. Unisul.
- Dgterritório - SNIG (2020). Visualizador online. SNIG <https://snig.dgterritorio.gov.pt/rndg/srv/por/catalog.search#/map>

DroneEng (2015). *Planejamento de voo: tudo que você precisa saber*. Drone e Engenharia. <https://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo-tudo-que-voce-precisa-saber/>

DroneEng (2017a). *Variação de GSD: como funciona?* Drones e Engenharia. <https://blog.droneng.com.br/variacao-de-gsd/>

DroneEng (2017b). *O que é a janela de voo*. Drones e Engenharia. <https://blog.droneng.com.br/o-que-e-janela-de-voo/>

DroneEng (2018). *Como realizar a importação dos dados de entrada no Agisoft Metashape?* Drones e Engenharia. <https://blog.droneng.com.br/como-importar-dados-de-entrada-no-agisoft/>

Duarte, J. A. M. (2010). *Estudo de áreas com potencial para extração de rochas ornamentais: Aplicação prática ao estudo da pedreira “EM&R” nº 6478. Aplicação conjunta de dados de prospeção geofísica, análise estrutural e modelação informática*. Dissertação apresentada à Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas.

Duarte, D. & Gonçalves, G. (2015). Produção automática de ortofotos em áreas urbanas utilizando veículos aéreos não-tripulados e software de código aberto. In G. Santos, J. G., Fonte, C., Figueiredo, R. F., Cardoso, A., Gonçalves, G., Almeida, J. P. & Baptista, S. (Eds.), *Atas das I Jornadas Lusófonas de Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica* (pp.705-722). Imprensa da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316.2/37095>

Duarte, J.A.M. (2018). *Contributos para a caracterização de áreas com potencial para a extração de rochas carbonatadas - Análise integrada de dados fotogramétricos, geológicos e geofísicos para caracterização de maciços rochosos carbonatados*. Dissertação de Doutoramento em Geotecnologias, Universidade de Coimbra. Repositório Digital da Produção Científica da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316/87557>

European Space Agency - ESA (2010) Interferência Atmosférica. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEME6965P1G_2.html

Figueiredo, R. J. N. A. (2019). *Inventariação e Modelação de Pedreiras de Dolomias no Concelho de Coimbra: Utilização de Dolomias no Património Histórico e Arquitectónico*. Dissertação apresentada à Universidade de Coimbra no âmbito do Mestrado em Geociências. Repositório Digital da Produção Científica da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316/93539>

Filho, A. A. S. (2005). *Uso de Altimetria e Imagens de Satélite na Diferenciação de Tipos Florestais*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco Brasil.

Filho, H. M. C. G. (2019). *Caracterização espectral das rochas da região da Mina Bonfim e produção de mapa prospectivo regional para skarns utilizando lógica difusa em área abrangendo as cidades de Lajes e João Câmara, Rio Grande do Norte*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências, Recife, Brasil.

Fonte, C. M. P. C. (2008). *Textos de apoio de Topografia*. Engenharia Civil. Departamento de Matemática, FCTUC, Universidade de Coimbra. https://www.mat.uc.pt/~cfonte/docencia/Topografia/Sebenta_civil_0405.pdf

Ge, W.; Cheng, Q.; Tang, Y.; Jing, L. & Gao, C. (2018). Lithological Classification Using Sentinel-2A Data in the Shibanjing Ophiolite Complex in Inner Mongolia, China. *Remote Sens.* v.10(4), pp.638. <https://doi.org/10.3390/rs10040638>

Gonçalves, G. R. (2005). *Elementos de Fotogrametria Analítica*. Engenharia Geográfica, Universidade de Coimbra.

Gonçalves, J. A., Manta, V., & Carvalho, M. (2015). Geração automática de orto-mosaicos de fotos aéreas de arquivo do Concelho de Coimbra. In G. Santos, J. G., Fonte, C., Figueiredo, R. F., Cardoso, A., Gonçalves, G., Almeida, J. P. & Baptista, S. (Eds.), *Atas das I Jornadas Lusófonas de Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica* (pp,748-766). Imprensa da Universidade de Coimbra. http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0983-6_44

Gonçalves, V. (s.d.) Indústria 4.0 nas pedreiras já é uma realidade. *Revista Agregados Online*. <https://agregadosonline.com.br/industria-4-0-nas-pedreiras-ja-e-uma-realidade/>

Gold fluvium (2011). Estudo de Impacte Ambiental da pedreira de “Boleiros”. *Consultores em Engenharia*. Volume I- Resumo não técnico reformulado, Portugal.

Konica Minolta Sensing Americas (2011). *Color Data Software CM-S100w SpectraMagic NX Professional /Lite versão 2.1*. Instruction Manual.

Konica Minolta Sensing Americas (2014). *Espectrofotômetro CM-700d*. <https://sensing.konicaminolta.us/br/products/espectrofotometro-cm-700d/>

Landis R. J. & Koch G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical *Biometrics*, Vol. 33 (1), pp. 159-174. International Biometric Society Stable. <http://www.jstor.org/stable/2529310>

Lima, S. T., & Sousa, J. B. (2018) *Geoprocessamento e análise ambiental: susceptibilidade a movimento de massas*. Disponível em: <http://www.geomorfologia.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo1/086.pdf>

Lino R. S (2018). *Composição de Ortomosaicos de Fotografia Aérea do Arquivo da Câmara Municipal do Porto*. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica, Universidade do Porto). Repositório Aberto da Universidade do Porto. <https://hdl.handle.net/10216/121645>

Lopes, L.C. (2009). *Controle metroológico da cor aplicado à estamperia digital de materiais têxteis*. Dissertação realizada para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade Industria, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0621484_09_pretextual.pdf

Lopes, M. F. A. A. (2015). *Aplicação de VANT em estudos geomorfológicos dos litorais rochosos: o exemplo de S. Paio, Vila do Conde*. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território, Universidade do Porto. Repositório Aberto da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/81690>

Manuppella, G.; Barbosa, B.; Machado, B.; Carvalho, J. & Bartolomeu, A., (1998). Folha 27-A (Vila Nova de Ourém). Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50000, 2ª ed. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa. https://geoportal.ineg.pt/pt/dados_abertos/cartografia_geologica/cgp50k/27-A

Manuppella, G.; Antunes, M. T.; Almeida, C. A. C.; Azerêdo, A. C.; Barbosa, B.; Cardoso, J. L.; Crispim, J. A.; Duarte, L. V.; Henriques, M. H.; Martins, L. T.; Ramalho, M. M.; Santos, V. F. e

Terrinha, P. (2000). Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50000, Notícia Explicativa da Folha 27-A, Vila Nova de Ourém. Inst. Geol. e Mineiro, Lisboa, 156 p.

Martins, O. R. (2010). Contributo para o Relançamento do Sector Global das Rochas Ornamentais. *Rochas & Equipamentos*, 97, 32-48.

Marino T. B. (s.d.) *Resolução espacial, Espetral Radiométrica, Temporal*. Departamento de Geociências. <https://www.tiagomarino.com/classes/EXTRAS/material/6%20-%20Resolucao%20Espacial%20x%20Espectral%20x%20Radiometrica%20x%20Temporal.pdf>

Máximo, O. A., & Fernandes D. (2005) Classificação supervisionada de imagens SAR do SIVAM pré-filtradas. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, INPE, p. 4139-4146

Meneses, P.R. & Sano, E.E. (2012). Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P.R. & ALMEIDA T. DE. (Coordenadores). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília: UNB, CNPQ, pp. 191-208.

Meneses, P. R. & Almeida, T., (2019a). Fundamentos de Espetrorradiometria. In A.P. Chaves, C. G. Silva, C.C.K. Kowaltowski, J. G. Tundisi, L.E. Sánchez, P. Helene, R. F. Santos & T. G. Florenzano (Eds.), *Refletância dos Materiais Terrestres: análise e interpretação* (pp.15). Oficina de Textos.

Meneses, P. R. & Almeida, T., (2019b). Refletância das Rochas. In A.P. Chaves, C. G. Silva, C.C.K. Kowaltowski, J. G. Tundisi, L.E. Sánchez, P. Helene, R. F. Santos & T. G. Florenzano (Eds.), *Refletância dos Materiais Terrestres: análise e interpretação* (pp.199). Oficina de Textos.

Melo Júnior, C. M., Evangelista Júnior, F., Silva, L. S., Nepomuceno A. A., (2018). Geração de mapas de danos de fachadas de edifícios por processamento digital de imagens capturadas por Vant e uso de fotogrametria digital. *Revista Ambiente Construído*, 18 (3), 211-226. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300277>

Naleto J. L. C. (2018). Mapeamento Hiperespectral de associações minerais relacionadas ao depósito de ouro da Pedra Branca, Maciço de Troia, Ceará. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Geociências, apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

Neto M. S. (2016). *Para que serve o GSD?* ,Drones & Engenharia. <https://blog.droneng.com.br/gsd/>

Novo, E.M.L.M (2010). *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. (4ª ed.).Blucher. https://books.google.pt/books?id=RErIDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Oliveira, G.C.; Martins, V.S.; Filho, E I.F.; Xavier, F.V. (2014). Classificação Supervisionada como Ferramenta para Avaliação da Dinâmica do Uso e Cobertura do Solo. *Revista Enciclopédia Biosfera*, v. 10, n. 18, p. 924-935.

Pereira, J. P. M. (2019). *O papel da informação espectral na caracterização das rochas: o caso do Grupo das Beiras (Portugal Central)*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Geociências, Universidade de Coimbra. Repositório Digital da Produção Científica da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316/93603>

Phantom 4 (s.d.) *Phantom 4 Specs*. (DJI) Dà-Jiāng Innovations Science and Technology. <https://www.dji.com/pt/phantom-4/info>

Queiroz T. B., Sousa, R. S., Baldin T., Batista, F. J., Juliana Marchesan, Pedrali L. D., Pereira R. S. (2017) Avaliação do desempenho da classificação do uso e cobertura da terra a partir de imagens Landstat 8 e Rapideye na região central do Rio Grande do Sul. *Geociências*, São Paulo, UNESP, , v. 36, n. 3, p. 569 – 578. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i3.11910>

QGIS Development Team (2021). QGIS geographic information system. QGIS Association. <https://www.qgis.org>

QGIS Development Team (2022). *QGIS v 3.22.4, Geographic Information System User Guide. Open Source Geospatial Foundation Project. Electronic document*: <http://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/>>

Regulamento n.º 1093/2016 da Autoridade Nacional de Aviação Civil (2016). Diário da República: II série - Parte E, n.º 238. <https://files.dre.pt/2s/2016/12/238000000/3661336622.pdf>

Santos, A. C. T. (2010) *Aplicação multivariável na caracterização de sedimentos de corrente*. (Dissertação apresentada para provas de Mestrado em Química, Ramo de Controlo de Qualidade e Ambiente, Universidade de Coimbra). Repositório da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316/15969>

Sekertekin, A., Marangoz, A. M., and Akcin, H. (2017) *PIXEL-BASED CLASSIFICATION ANALYSIS OF LAND USE LAND COVER USING SENTINEL-2 AND LANDSAT-8 DATA*, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W6, 91–93, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-91-2017>

Software de Analytics & Soluções- SAS (s.d.) *Machine Learning: O que é e qual sua importância?* https://www.sas.com/pt_br/insights/analytics/machine-learning.html

Tommaselli, A. M. G. (2009) *Fotogrametria Básica – Introdução*. Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil

Vaeza, R.F.; Filho, P.C.O.; Maia, A.G.; Disperati, A.A. (2010). Uso e ocupação do solo em Bacia Hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução. *Floresta e Ambiente*, v. 17, n. 1, p. 23-29, 2010. <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/17637>

Vale, J. R. B., Costa J. A., Santos J. F., Silva, E. L. S., Favacho A. T. (2018) Análise Comparativa de métodos de classificação supervisionada aplicada ao mapeamento da cobertura do solo no município de Mecedilândia, Pará Interespaço- Revista de Geografia e Interdisciplinaridade v. 4, n. 13 . <http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.v4n13p26-44>

Valente, B. M. G. (2019). *Aplicação da Fotogrametria para o Estudo da Blocometria numa Pedreira de Rocha Ornamental*. Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Universidade de Coimbra. Repositório Digital da Produção Científica da Universidade de Coimbra. <http://hdl.handle.net/10316/86786>

Verhoeven, G. (2011) Taking Computer Vision Aloft: Archaeological Three-Dimensional Reconstructions From Aerial Photographs With Photoscan. *Archaeological Prospection*, v. 18, n. 1, p. 67-73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>

Watts, A. C., Ambrosia, V. G., Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use, *Remote Sensing* 4: pp. 1671- 1692.

Wei, J., Liu, X. & Liu, J. (2016). Integrating Textural and Spectral Features to Classify Silicate-Bearing Rocks Using Landsat 8 Data. *Applied Sciences*, 6(10), 283. <https://doi.org/10.3390/app6100283>.

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, pp. 300-314.

ANEXOS

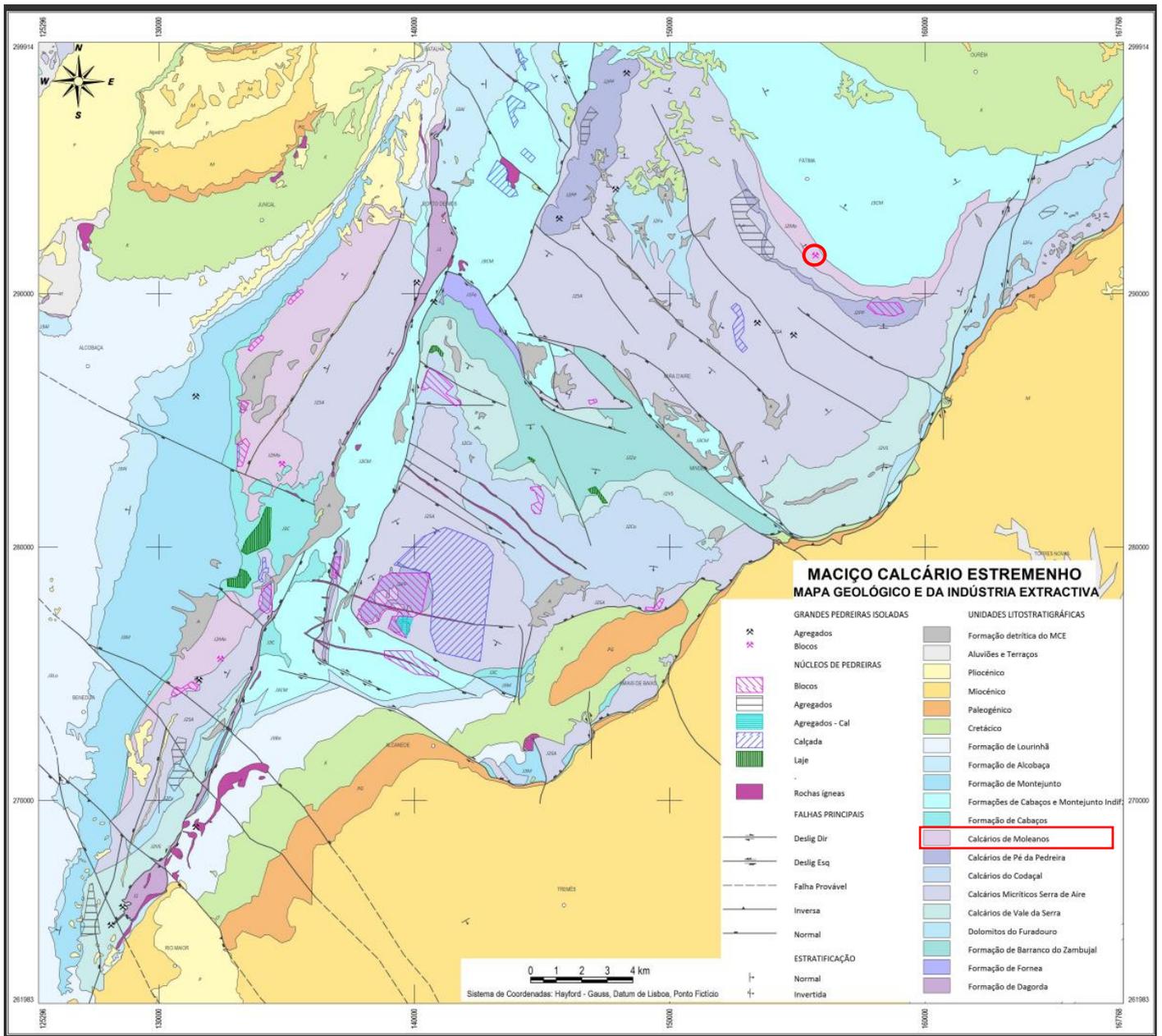


Figura A1: Mapa geológico do MCE com indicação das principais pedreiras e núcleos de indústria extractiva (geologia adaptada das cartas geológicas 1/50000 do LNEG) e com destaque nas pedreiras em estudo (assinaladas a vermelho).

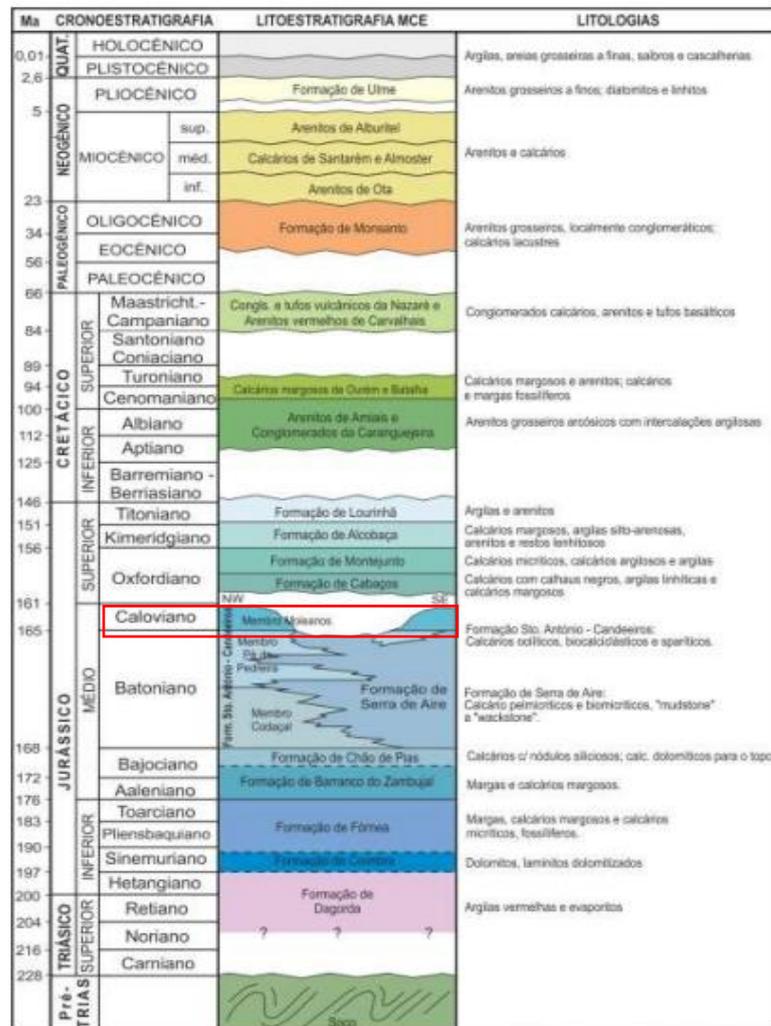


Figura A2: Litostratigrafia do MCE (Adaptado de Carvalho, 2013). A localização das litologias aflorantes na área de estudo, encontra-se assinalada com um retângulo vermelho.

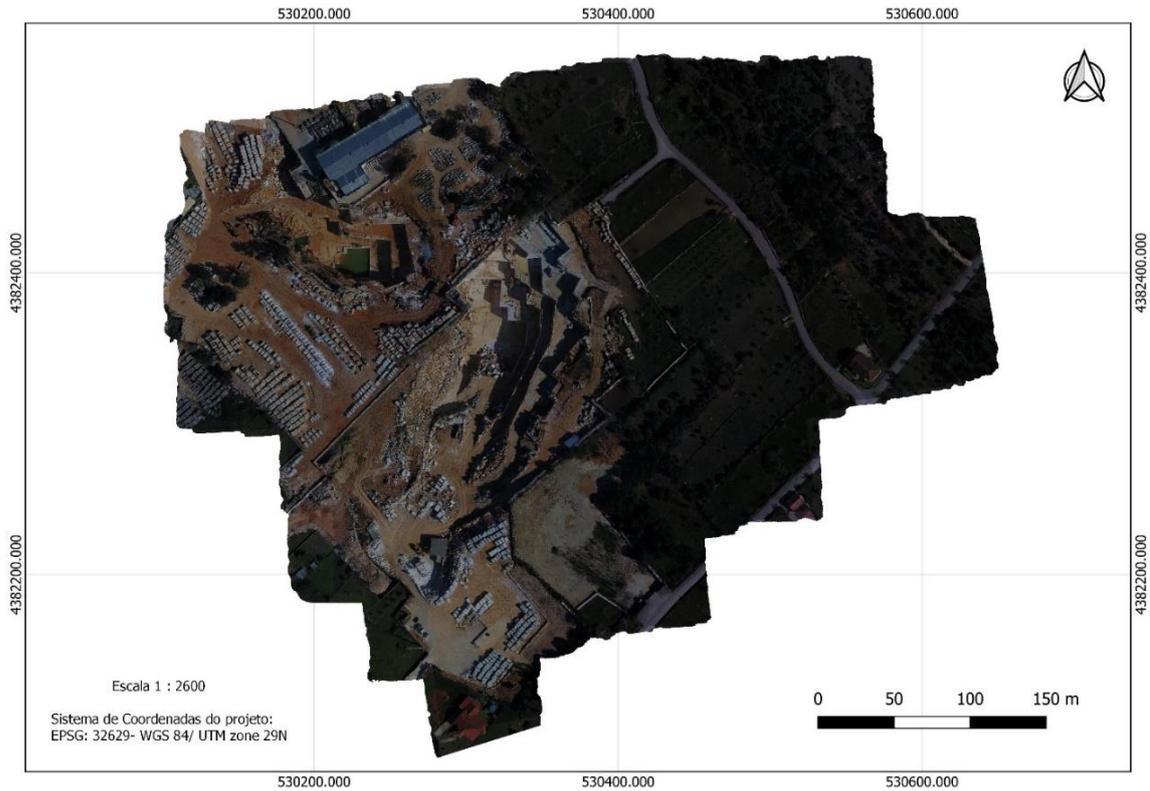


Figura A3 – Ortophotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 04/04/2022 10.00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.

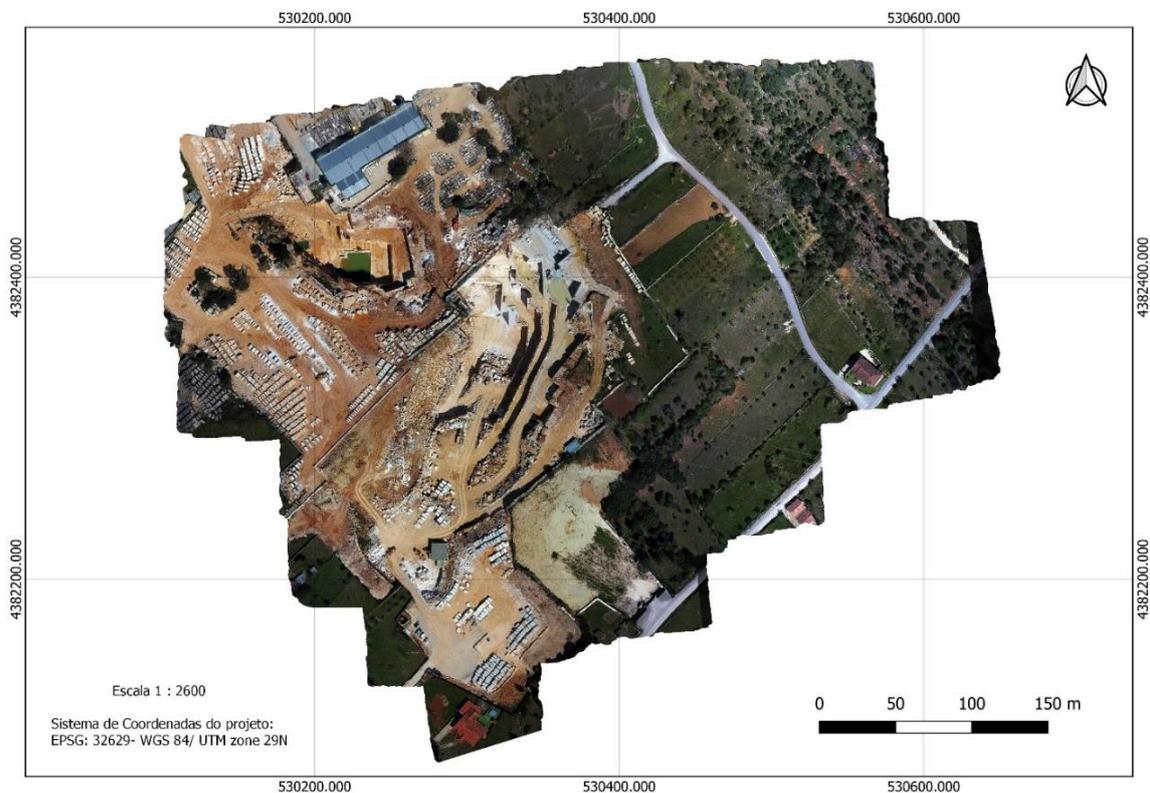


Figura A4 – Ortophotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 04/04/2022 12.00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas, editado no GIMP.



Figura A5 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 27/05/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.

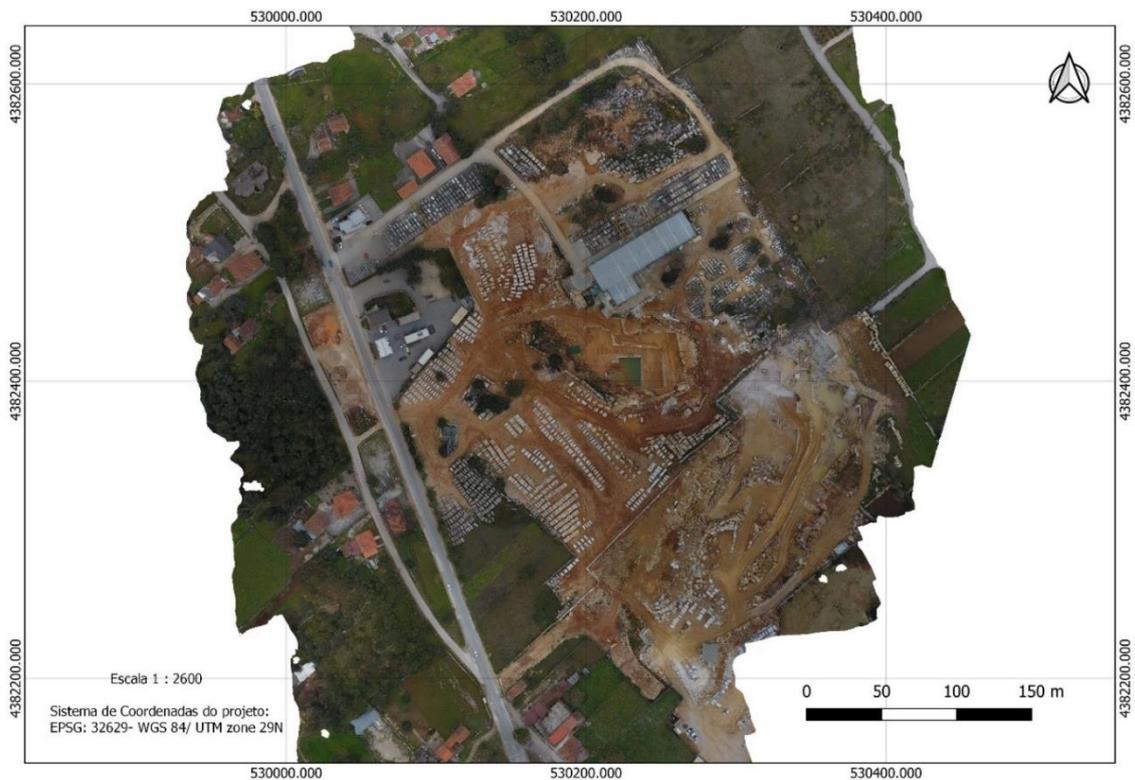


Figura A6 – Ortofotomapa criado a partir dos dados obtidos no voo VANT do dia 17/03/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720 e na região envolvente das mesmas.



Figura A7 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 04/04/2022 10:00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.



Figura A8 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 04/04/2022 12:00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.



Figura A9 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 04/04/2022 12:00, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720, editado no *GIMP*.



Figura A10 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 27/05/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.

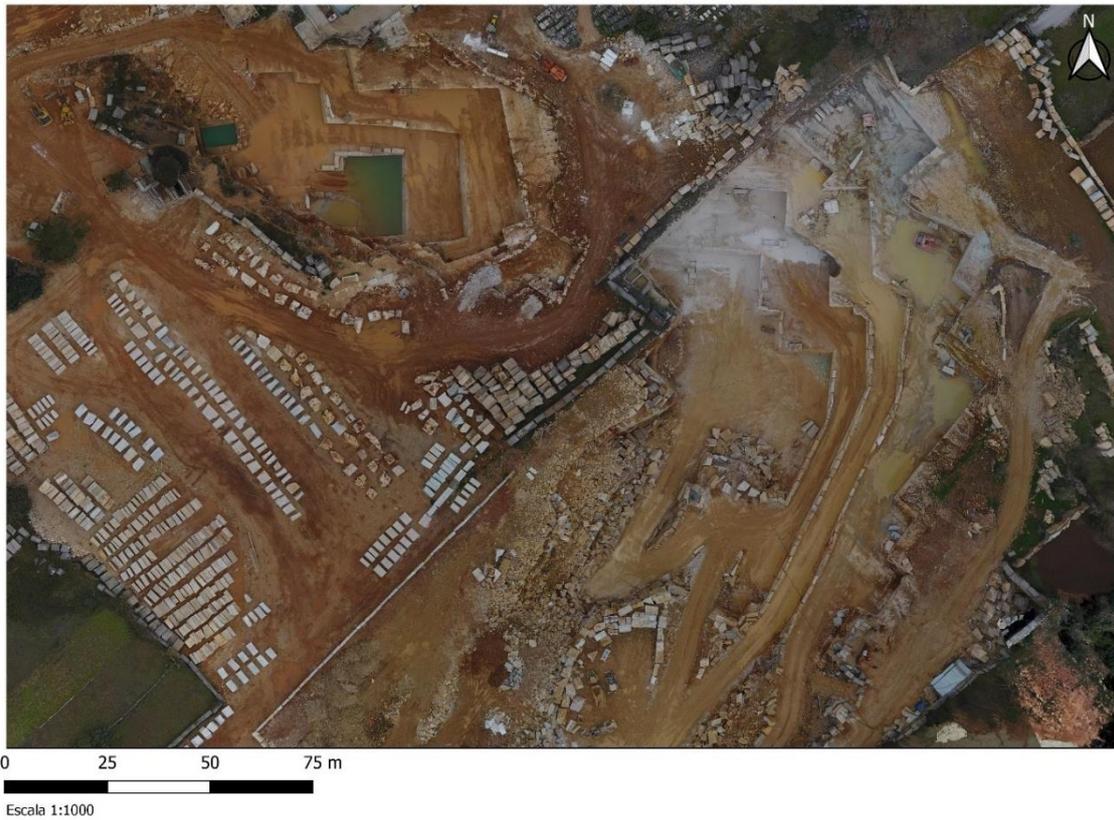


Figura A11 – Recorte e ampliação do ortofotomapa criado do dia 17/03/2022, realizado nas pedreiras EM&R e Lagoa nº 6720.

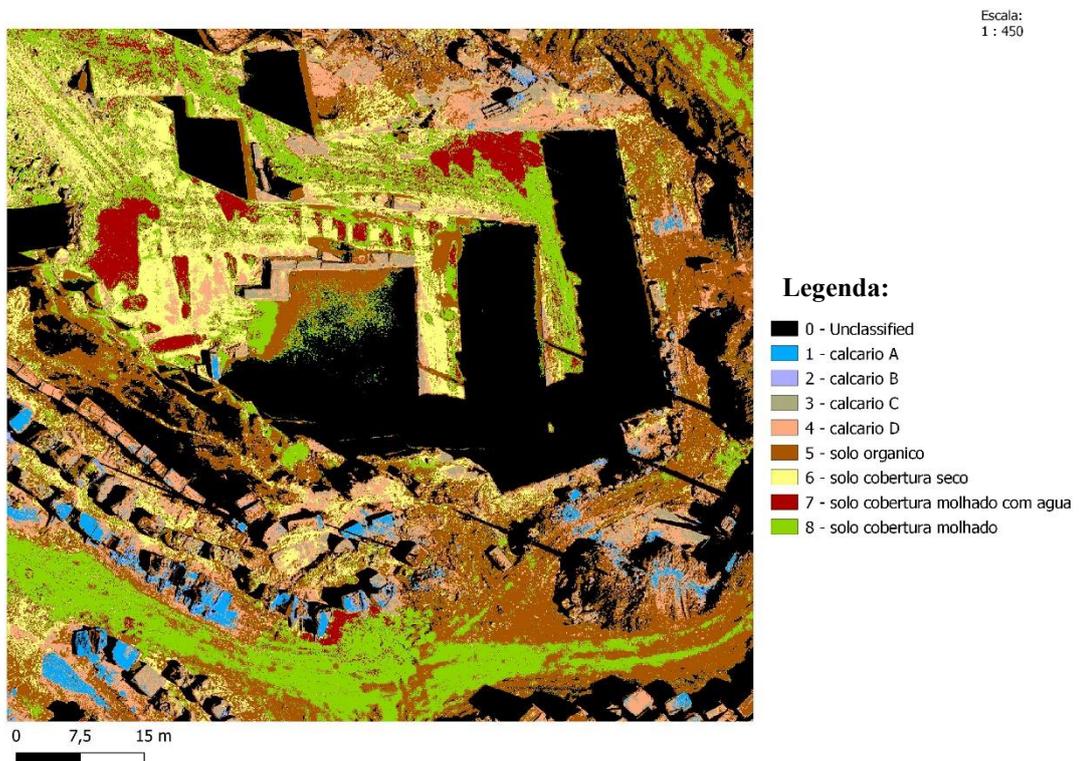
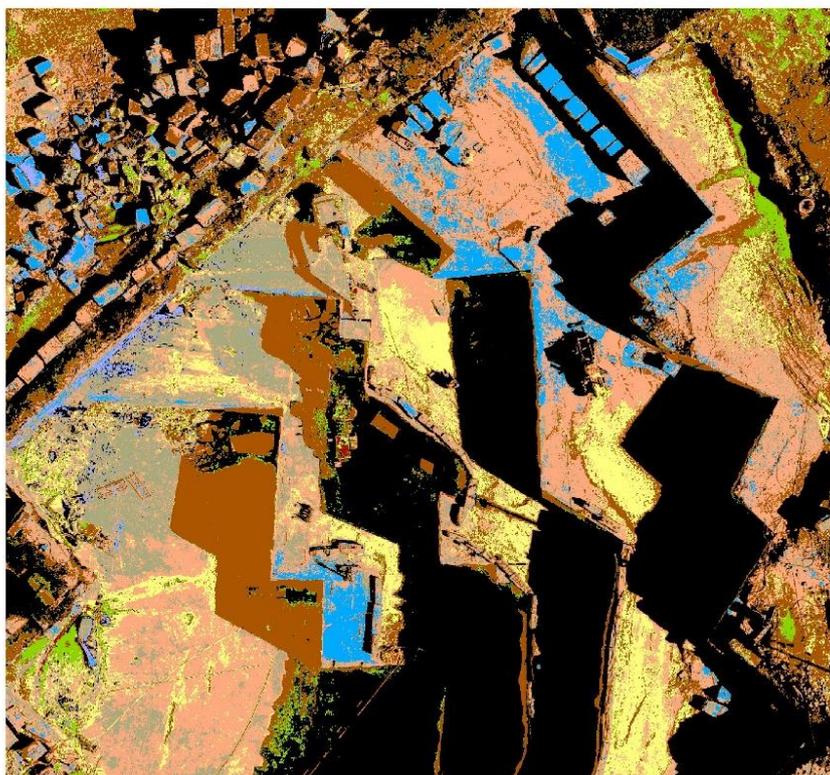


Figura A12: Classificação 04/04/2022 10:00, com ampliação na pedreira EM&R.

Escala:
1 : 450



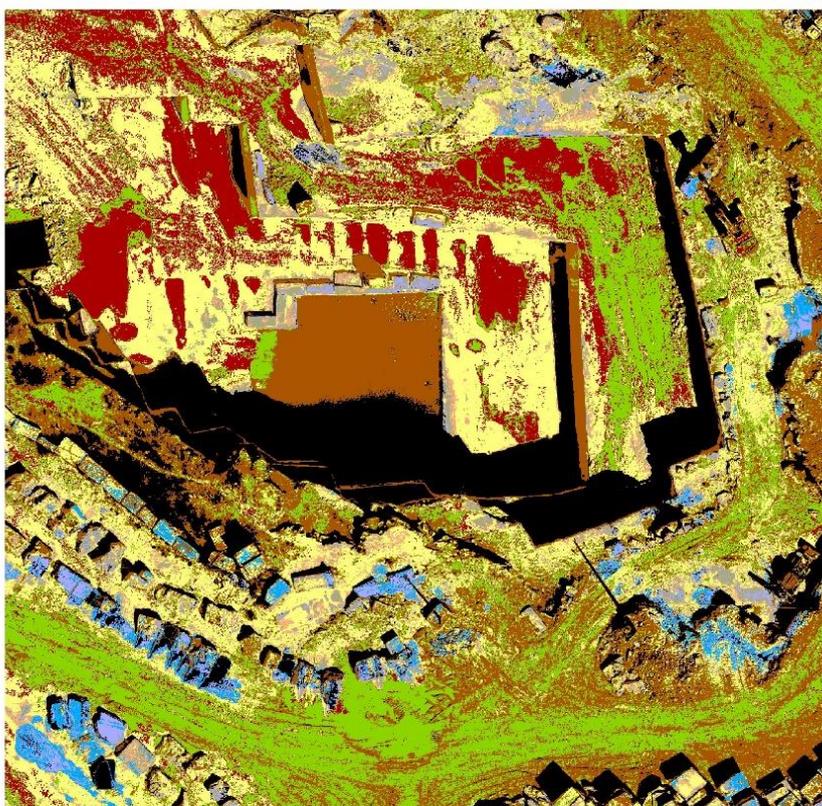
Legenda:

- 0 - Unclassified
- 1 - calcario A
- 2 - calcario B
- 3 - calcario C
- 4 - calcario D
- 5 - solo organico
- 6 - solo cobertura seco
- 7 - solo cobertura molhado com agua
- 8 - solo cobertura molhado

0 7,5 15 m

Figura A13: Classificação 04/04/2022 10:00, com ampliação na pedreira Lagoa nº 6720.

Escala:
1: 450

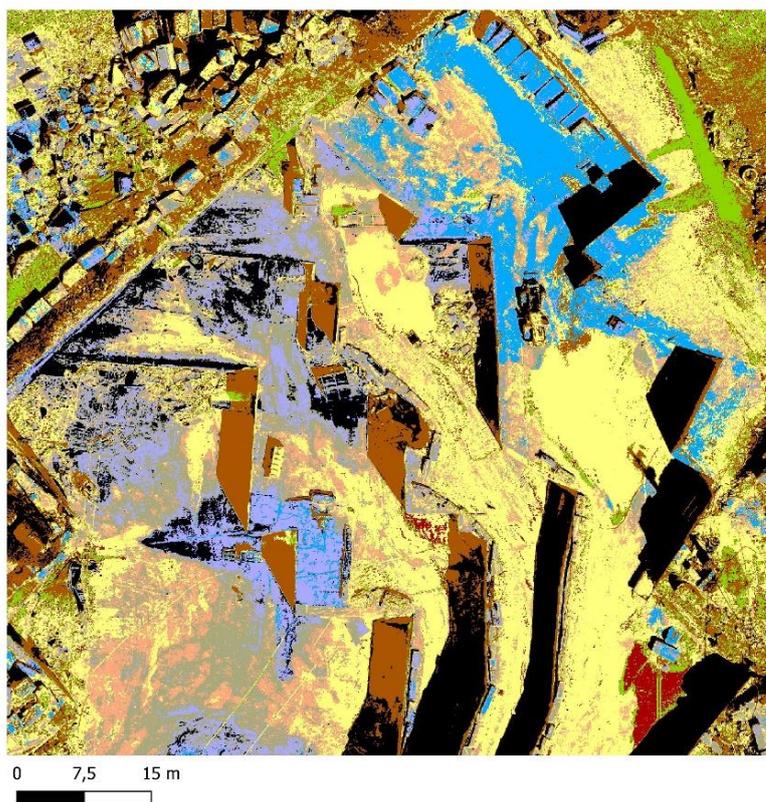


Legenda:

- 0 - Unclassified
- 1 - calcario A
- 2 - calcario B
- 3 - calcario C
- 4 - calcario D
- 5 - solo organico
- 6 - solo cobertura seco
- 7 - solo cobertura molhado com agua
- 8 - solo cobertura molhado

0 7,5 15 m

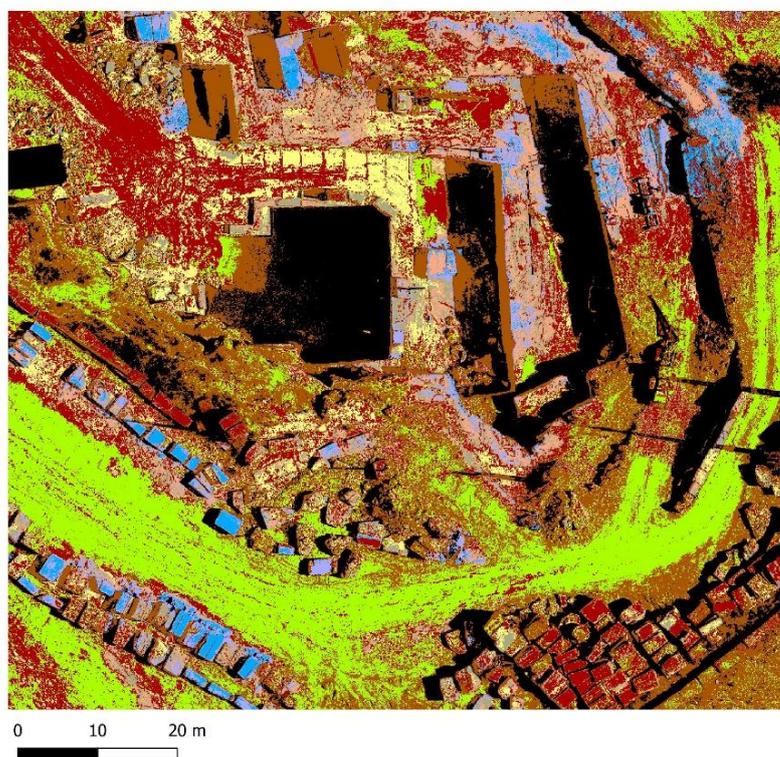
Figura A14: Classificação 04/04/2022 12:00, com ampliação na pedreira EM&R.



Legenda:

- 0 - Unclassified
- 1 - calcario A
- 2 - calcario B
- 3 - calcario C
- 4 - calcario D
- 5 - solo organico
- 6 - solo cobertura seco
- 7 - solo cobertura molhado com agua
- 8 - solo cobertura molhado

Figura A15: Classificação 04/04/2022 12:00, com ampliação na pedra Lagoa nº 6720.
1:500



Legenda:

- 0 - Unclassified
- 1 - calcario A
- 2 - calcario B
- 3 - calcario C
- 4 - calcario D
- 5 - solo organico
- 6 - solo cobertura seco
- 7 - solo cobertura molhado com agua
- 8 - solo mistura

Figura A16: Classificação 27/05/2022, com ampliação na pedra EM&R.

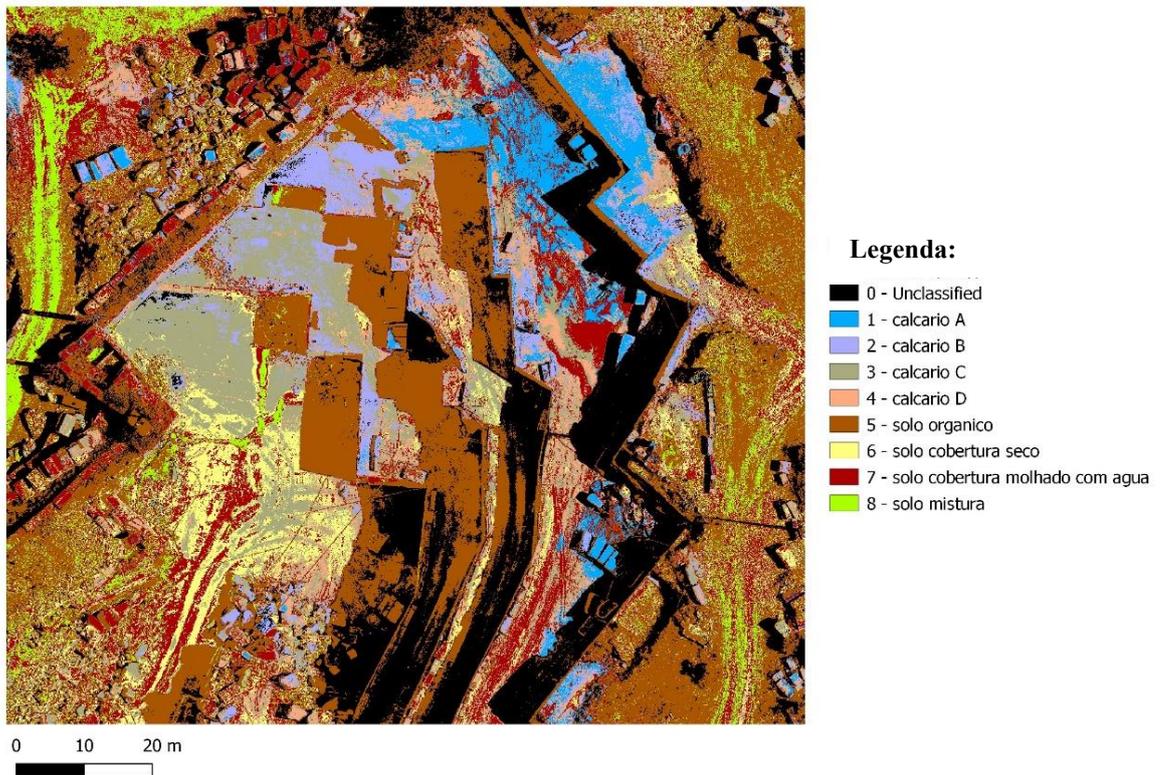


Figura A17: Classificação 27/05/2022, com ampliação na pedreira Lagoa nº 6720.

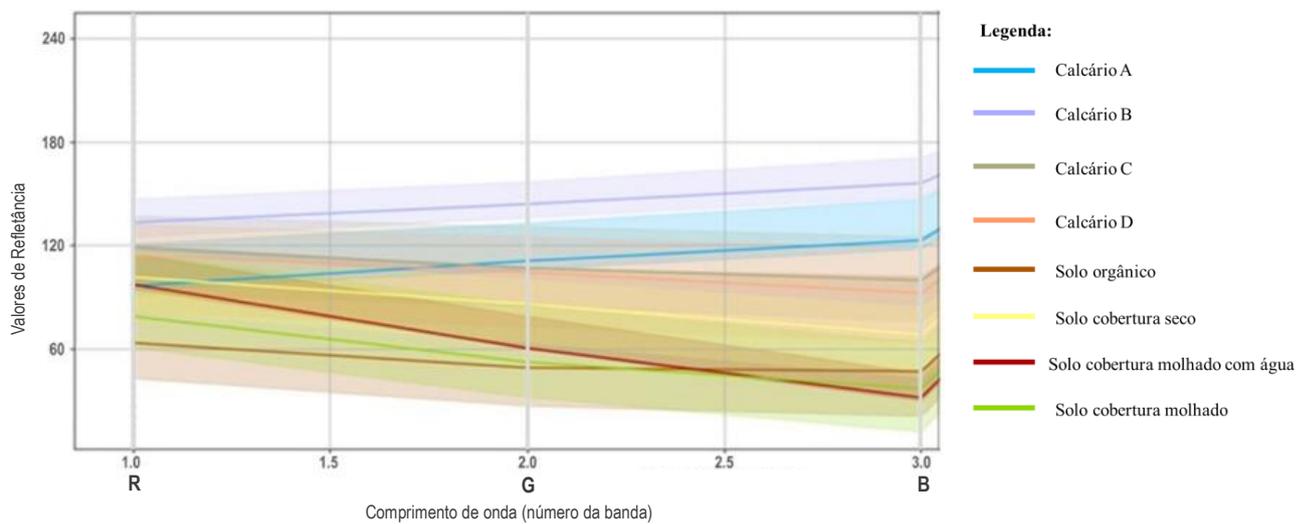


Figura A18: Curvas espectrais com valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada no ortofotomapa do dia 04/04/2022 10:00

Tabela A1: Valores de refletância máximo e mínimos para cada classe mapeada, no ortofotomapa do dia 04/04/2022 12:00.

MC Nome	Cor da classe	B1 min	B1 máx	B2 mix	B2 máx	B3 min	B3 máx
calcário A		107	131	119	144	135	160
calcário B		126	147	136	157	148	170
calcário C		121	112	156	156	104	152
calcário D		108	162	99	153	89	146
solo orgânico		43	120	27	107	21	102
solo cobertura seco		119	151	102	136	84	119
solo cobertura molhado com água		117	134	82	100	41	59
solo cobertura molhado		75	137	44	103	19	80

Tabela A2: Valores de refletância média do dia 04/04/2022 12:00, para cada classe mapeada e atribuição da composição RGB à cor correspondente.

MC Nome	B1	B2	B3	RGB
calcário A	119	132	148	
calcário B	136	146	159	
calcário C	141	134	128	
calcário D	135	126	117	
solo orgânico	82	67	62	
solo cobertura seco	135	119	102	
solo cobertura molhado com água	125	91	50	
solo cobertura molhado	106	73	49	

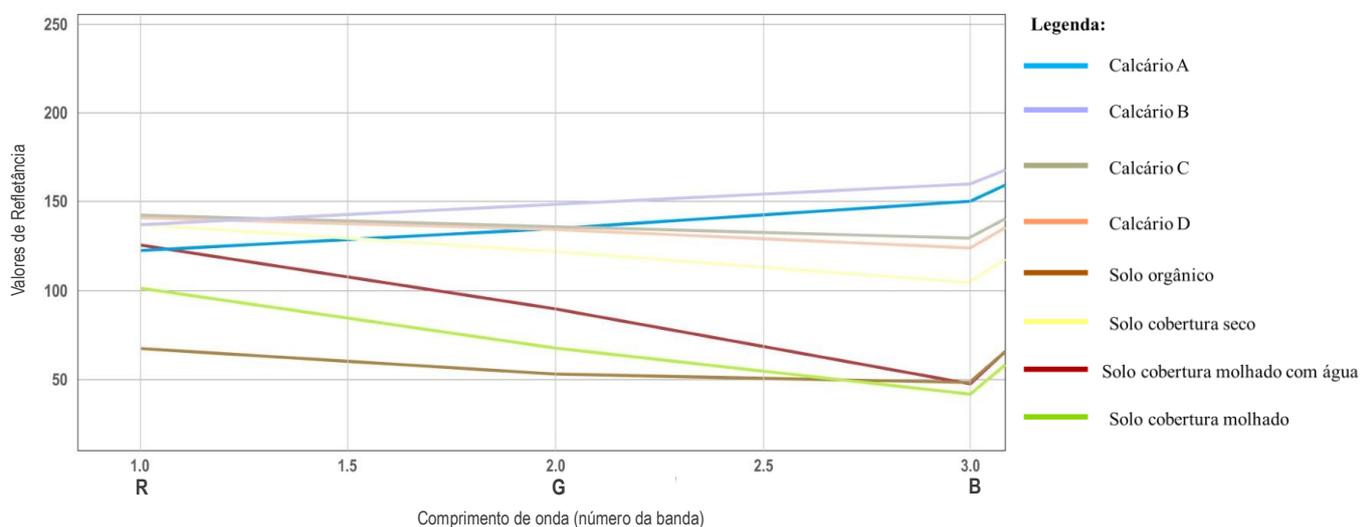


Figura A19: Comportamento espectral (refletância) das classes mapeadas nas 3 bandas disponíveis para o dia 04/04/2022 12:00, onde consta o valor da refletância (0-255) versus comprimento de onda (número da banda) (Fonte: QGIS)

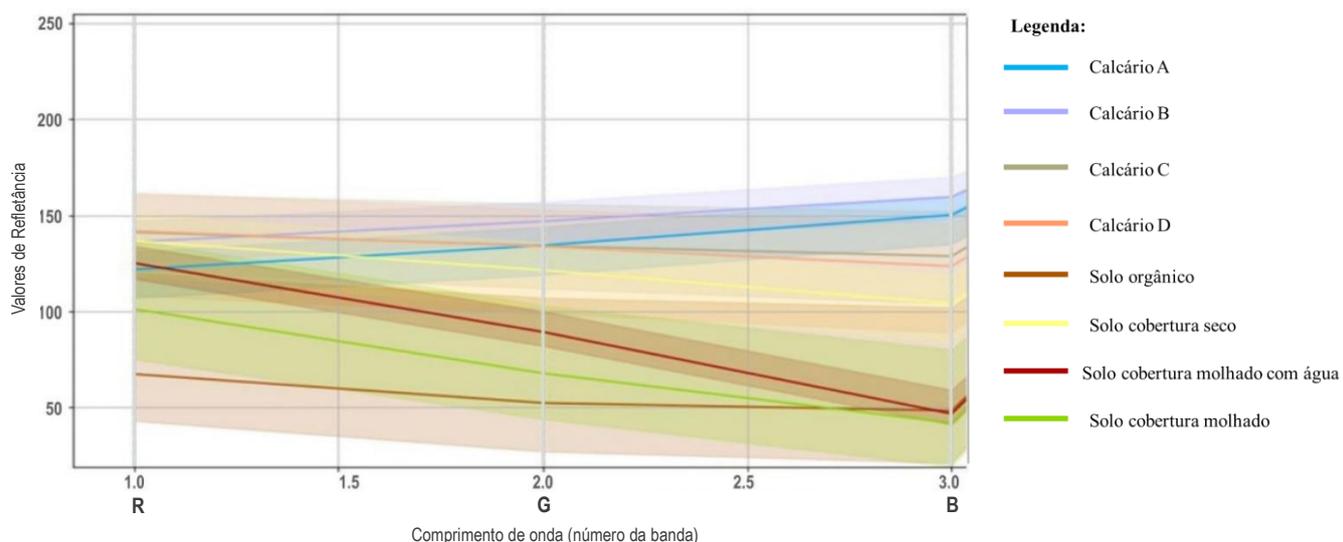


Figura A20: Curvas espectrais com valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada no ortofotomapa do dia 04/04/2022 12:00.

Tabela A3: Valores de refletância máximo e mínimo para cada classe mapeada no ortofotomapa do dia 27/05/2022.

MC Nome	Cor da classe	B1 min	B1 máx	B2 min	B2 máx	B3 min	B3 máx
calcário A		114	145	124	155	136	167
calcário B		140	170	140	170	139	172
calcário C		130	167	122	163	114	158
calcário D		111	163	106	157	100	155
solo orgânico		43	126	28	112	21	105
solo cobertura seco		114	163	98	149	80	132
solo cobertura molhado com água		120	136	110	126	90	107
solo cobertura molhado		86	140	53	109	32	84

Tabela A4: Valores de refletância média do dia 27/05/2022, para cada classe mapeada e atribuição da composição RGB à cor correspondente.

MC Nome	B1	B2	B3	RGB
calcário A	130	139	151	
calcário B	155	155	155	
calcário C	149	143	136	
calcário D	137	131	128	
solo orgânico	84	70	63	
solo cobertura seco	138	123	106	
solo cobertura molhado com água	128	118	98	
solo mistura	113	81	58	

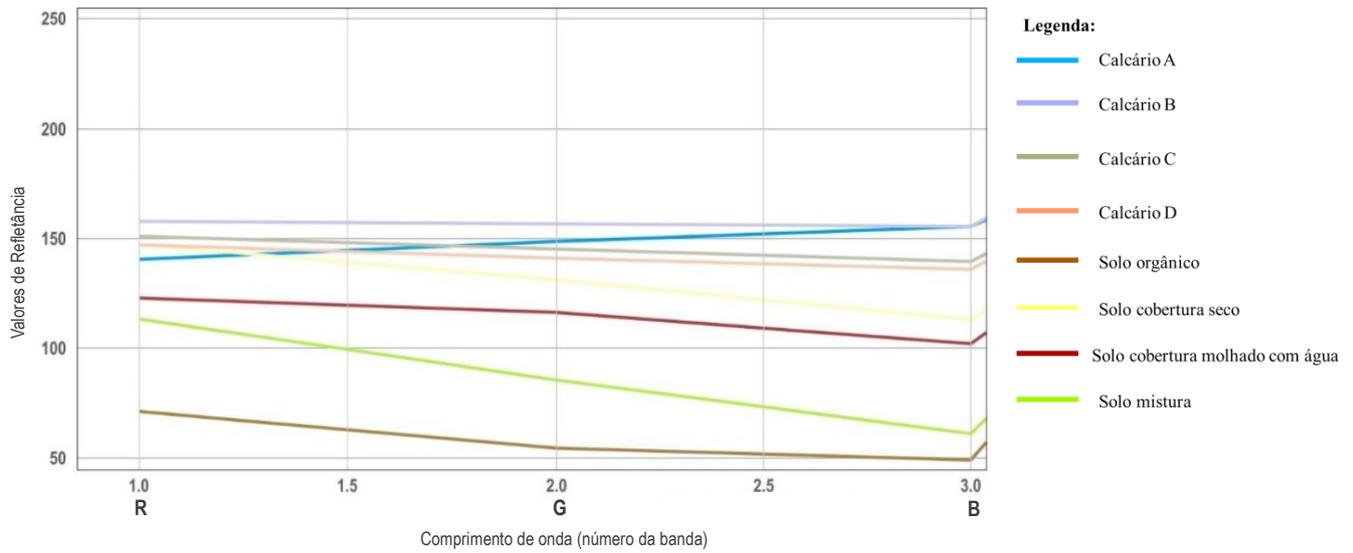


Figura A21: Comportamento espectral (refletância) das classes mapeadas nas 3 bandas disponíveis do dia 27/05/2022, onde consta o valor da refletância (0-255) versus comprimento de onda (número da banda) (Fonte: QGIS)

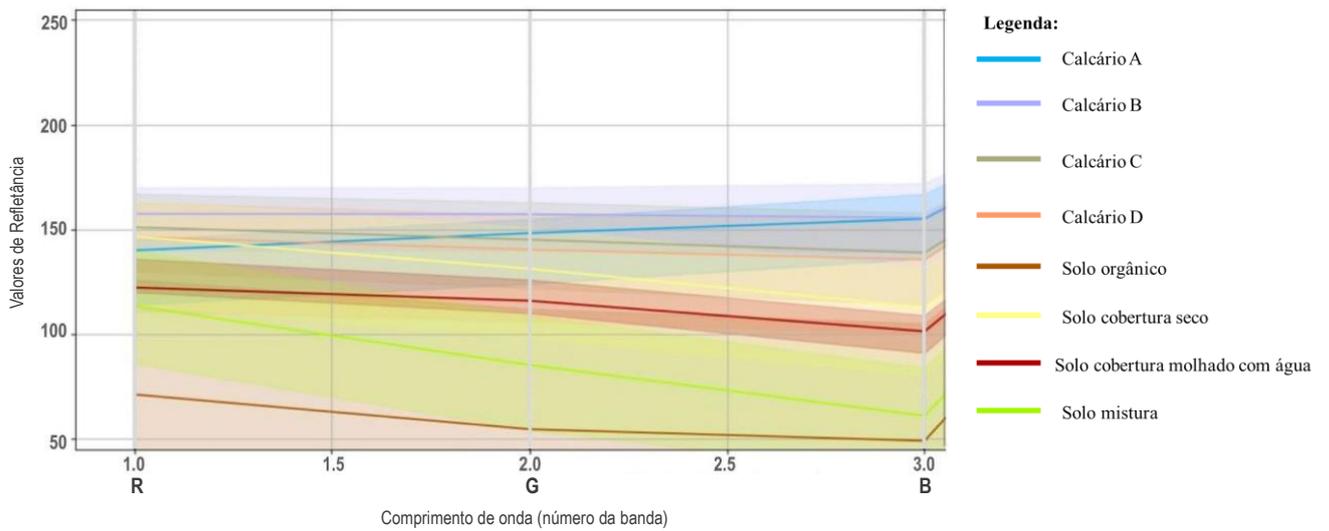


Figura A22: Curvas espectrais com valores de refletância máximos e mínimos para cada classe mapeada no ortofotomapa do dia 27/05/2022.