

Monitorização integrada da escombreira de S. Pedro da Cova, através de técnicas geoespaciais

João Filipe Freitas Lopes Fernandes

Mestrado Engenharia Geográfica

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do
Território

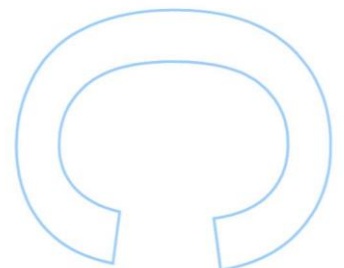
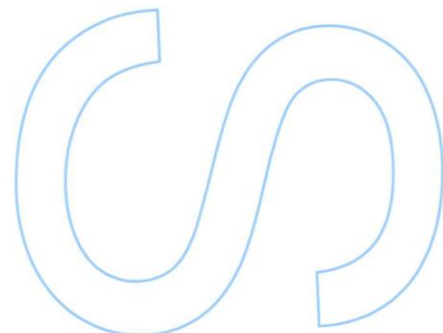
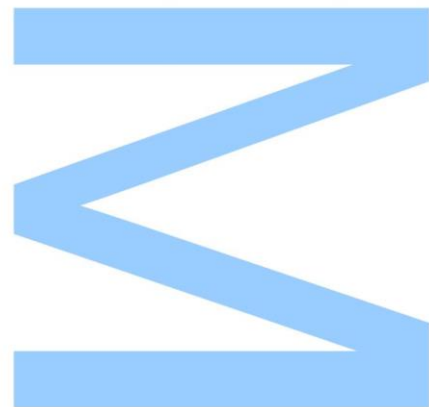
2022

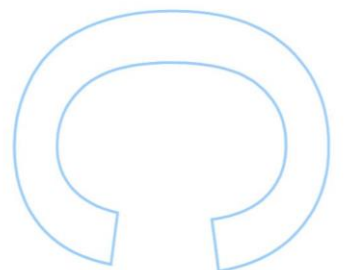
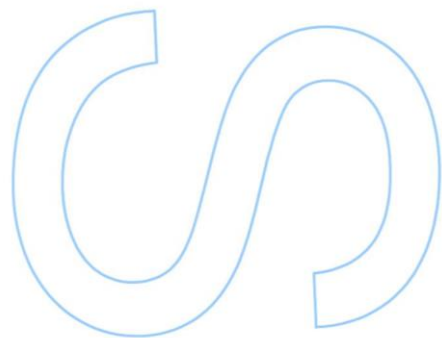
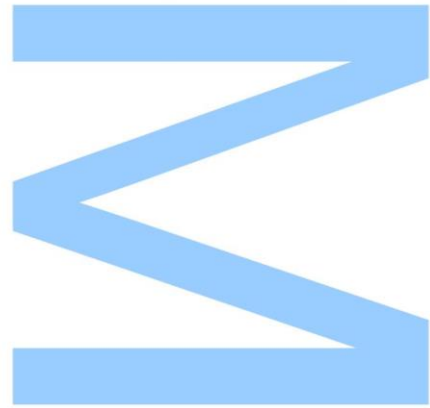
Orientador

Prof. Doutora Ana Cláudia Moreira Teodoro, Professora Associada
com Agregação, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Coorientador

Prof. Doutora Lia Bárbara Cunha Barata Duarte, Professora
Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto





Declaração de Honra

Eu, João Filipe Freitas Lopes Fernandes, inscrito no Mestrado Engenharia Geográfica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto declaro, nos termos do disposto na alínea a) do artigo 14.º do Código Ético de Conduta Académica da U.Porto, que o conteúdo da presente dissertação de projeto Monitorização integrada da escombreira de S. Pedro da Cova, através de técnicas geoespaciais reflete as perspetivas, o trabalho de investigação e as minhas interpretações no momento da sua entrega.

Ao entregar esta dissertação de projeto Monitorização integrada da escombreira de S. Pedro da Cova, através de técnicas geoespaciais reflete as perspetivas, declaro, ainda, que a mesma é resultado do meu próprio trabalho de investigação e contém contributos que não foram utilizados previamente noutros trabalhos apresentados a esta ou outra instituição.

Mais declaro que todas as referências a outros autores respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, encontrando-se devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências bibliográficas. Não são divulgados na presente dissertação de projeto Monitorização integrada da escombreira de S. Pedro da Cova, através de técnicas geoespaciais reflete as perspetivas quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor.

Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

João Filipe Freitas Lopes Fernandes

Porto, 30 de setembro de 2022

Agradecimentos

Apesar da realização deste trabalho ser por definição um trabalho individual, não posso deixar de reconhecer e valorizar que não seria possível finalizar este percurso sem a ajuda de várias pessoas que se mostraram sempre presentes e dispostas a ajudar-me. Apresento assim os meus agradecimentos a todos os que de uma forma ou de outra, me acompanharam neste percurso.

Em primeiro lugar apresento a minha gratidão a Professora Doutora Deolinda Flores pela oportunidade irrecusável e incentivo para dar mais um passo em frente. Um sincero obrigado pela confiança, por acreditar em mim e nas minhas capacidades e por expandir as minhas oportunidades académicas e profissionais.

Agradeço à minha orientadora Prof. Doutora Ana Cláudia Teodoro não só nesta etapa final, mas por toda a dedicação e ajuda ao longo do meu percurso académico, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e compreensão nos momentos mais críticos, e disponibilidade para qualquer esclarecimento sempre que precisava. À Prof. Doutora Lia Duarte, coorientadora, pelo profissionalismo, pela disponibilidade, apoio, orientação científica, compreensão e por todos os conhecimentos que partilhou comigo.

À Prof. Doutora Clara Lázaro que sempre com simpatia, compreensão e muita dedicação me orientou no percurso académico, tanto com críticas pertinentes como opiniões positivas que me permitiram evoluir e aprender com os meus erros.

Agradeço também à Doutora Patrícia Santos, pela maneira como me recebeu, pela simpatia e pelos conhecimentos profissionais que partilhou comigo.

A todos os Docentes da Faculdade de Ciências que tive a oportunidade de conhecer e que foram uma mais valia para o meu crescimento académico.

Resumo

A mina de carvão de S. Pedro da Cova, em Gondomar (Portugal), teve o início da sua exploração em 1795 e manteve-se até 1972. Atualmente consta de uma pilha de resíduos com cerca de 28.000 m² que se encontra em processo de autocombustão desde 2005.

O projeto *CoalMine* teve como objetivos a análise geoquímica do solo e lençóis freáticos, assim como, a medição e registo da temperatura da superfície da pilha de resíduos.

O processo de autocombustão é responsável pela mobilização de inúmeros poluentes nocivos e tóxicos que são absorvidos e mobilizados pelo solo, água e ar. Devido a esse risco para a saúde pública e preocupações ambientais é fundamental supervisionar a pilha de resíduos e registar modificações que esta possa sofrer, numa tentativa de conter e atenuar os potenciais riscos que possam resultar do processo de queima. Para a recolha e registo de dados na avaliação da superfície da pilha e estudo do processo da combustão, foram realizadas campanhas de voos de medições periódicas com diferentes sensores (câmara a cores, multiespectral e infravermelho térmico) e medições *in situ* (termómetro infravermelho).

Este trabalho (realizado no âmbito do projeto *CoalMine*) tem como objetivo principal o estudo e análise de dados obtidos referentes aos movimentos da superfície da escombreira e as suas alterações de temperatura.

Do processo de fotogrametria dos dados obtidos procedeu-se à elaboração de modelos digitais de elevação e ortomosaicos térmicos. A escombreira aparenta estar numa situação de modificação da sua elevação alterando aspetos da topografia, fator que possa estar a ocorrer devido à erosão e alteração dos níveis do solo resultantes dos pontos ativos de combustão, que durante o processo de queima resultam na perda de volume da pilha de resíduos.

Palavras-chave: pilha estéril de resíduos, autocombustão, sensores térmicos, fotogrametria, modelos digitais de elevação

Abstract

The S. Pedro da Cova coal mine, in Gondomar, Portugal, started its exploration in 1795 and lasted until 1972. Nowadays it consists of a pile of waste with approximately 28.000 m² that is in the process of self-combustion since 2005.

The *CoalMine* project goals included the geochemical analysis of soil and groundwater, as well as, measuring and recording the surface temperature of the waste pile.

The self-combustion process is responsible for mobilizing countless harmful and toxic pollutants that are absorbed and mobilized into soil, water and air. Due to this risk to public health and environmental concerns, it is essential to monitor the waste pile and record any changes that may occur, in an attempt to contain and mitigate the potential risks that can result from the burning process. To collect and record data in the evaluation of the surface of the pile and study the combustion process, periodic measurements with flight campaigns were made using different sensors (color camera, multispectral sensor and thermal infra-red sensor) and *in situ* measurements (thermal infra-red thermometer).

This study (carried out within the scope of the *CoalMine* project) has as its main objectives the study and analysis of data obtained regarding the movements of the surface of the heap and the changes of its temperature.

From the photogrammetric processing of the data obtained, digital elevation models and thermal orthomosaics were created. The waste pile elevation appears to be changing, altering its topographical aspects, which may be occurring due to erosion and as a result from active points of combustion. Places where the process of burning is occurring the waste pile loses its volume.

Key-words: sterile waste pile, auto-combustion, thermal sensors, photogrammetry, digital elevation models

Índice

Declaração de Honra.....	3
Agradecimentos.....	4
Resumo.....	5
Abstract.....	6
Lista de figuras.....	9
Lista de tabelas.....	11
Lista de abreviaturas.....	12
1. Introdução.....	13
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Área de estudo.....	15
1.2.1 História.....	15
1.2.2 Enquadramento geográfico e climático.....	19
1.2.3 Enquadramento geológico.....	20
2. Conceitos teóricos.....	23
2.1 Escombreira e autocombustão.....	23
2.2 Fotogrametria.....	24
2.3 Método geoestatístico – Krigagem.....	26
2.4 Classificação não supervisionada.....	27
2.5 Índices de vegetação.....	27
3. Metodologias.....	29
3.1 Metodologia de aquisição de dados <i>in situ</i>	29
3.2 Campanhas de voos – Ortomosaicos, modelos digitais de elevação e mapas de exposição e declive.....	30
3.3 Implementação de métodos geoestatísticos.....	31
3.4 Classificação não supervisionada.....	32
3.5 Índices de vegetação – NDVI e EVI.....	32
3.6 Base de dados e aplicação SIG.....	32
4. Equipamentos e <i>software</i> utilizados.....	34

4.1	Equipamento.....	34
4.2	<i>Software</i>	37
5.	Resultados e discussão	38
6.	Conclusão	53

Lista de figuras

Fig. 1 - Cavalete de S. Pedro da Cova (Monumento de Interesse Publico, março de 2010) [15].	16
Fig. 2 - Antiga Casa da Malta, agora o atual Museu Mineiro, Vila Verde [16].	17
Fig. 3 - Estátua ao Mineiro [17].	18
Fig. 4 - Pormenor das camadas profundas da escombreira em autocombustão [18].	18
Fig. 5 - Enxofre depositado no solo [18].	19
Fig. 6 - Enquadramento geográfico da área de estudo, Escombreira da Mina de S. Pedro da Cova em Portugal.	20
Fig. 7 - Carta de Depósitos Minerais, Região Norte de Portugal, 2019 [24].	21
Fig. 8 - Seleção da área de estudo de S.Pedro da Cova, da Carta de Depósitos Minerais, Região Norte de Portugal (Fig. 5), 2019 [24].	22
Fig. 9 - Recolha de dados in situ.	30
Fig. 10 - Phantom 4 Pro [48].	34
Fig. 11 - Micasense RedEdge [49].	34
Fig. 12 - FLIR Vue Pro R [50].	35
Fig. 13 - Electronic Temperature Instruments Ltd. Raytemp 4 [51].	35
Fig. 14 - Trimble R6 [52].	36
Fig. 15 - Ortomosaico produzido com os dados RGB recolhidos durante o voo de 23 de julho de 2019.	38
Fig. 16 - Ortomosaico produzido com os dados RGB recolhidos durante o voo de 30 de dezembro de 2019.	39
Fig. 17 - Mapa de declives da escombreira.	40
Fig. 18 - Mapa de orientação da área de estudo.	41
Fig. 19 - Ortomosaico térmico produzido com dados levantados durante o voo de 23 julho de 2019 (em cima) e Ortomosaico térmico produzido com os dados recolhidos no voo de 30 dezembro de 2019 (em baixo).	43
Fig. 20 - Ortomosaico térmico com os valores resultantes da krigagem comum.	44
Fig. 21 - Resultado da classificação não supervisionada, k-means clusters separação em 2 classes.	46
Fig. 22 - Resultado da classificação não supervisionada, k-means clusters separação em 3 classes.	47
Fig. 23 - Resultados do cálculo do NDVI a partir dos dados multiespectrais.	48
Fig. 24 - Resultados do cálculo do EVI a partir dos dados multiespectrais.	49

Fig. 25 - Alterações de altimetria estimadas a partir dos dois MDS sobre a área de estudo [9].....	50
Fig. 26 - Linhas de contorno calculada a partir dos dois MDS sobre a área de estudo [9].....	51
Fig. 27 - Vista da interface gráfica da aplicação SIG, onde se sobrepõe os dados do mosaico térmico com informação relacionada com o relevo e declive [19].....	52

Lista de tabelas

Tabela 1 - Especificações aplicadas as câmaras na altura do voo.	31
Tabela 2 - Especificações para cada modelo de câmara.	36
Tabela 3 - Características das bandas espectrais da câmara multiespectral, Micasense Red Edge.	37
Tabela 4 - Análise estatística do declive e orientação da escombreira.	42
Tabela 5 - Erros associados à krigagem.	44
Tabela 6 - Análise estatística dos ortomosaicos térmicos e temperaturas resultantes do método krigagem.	45

Lista de abreviaturas

BLUE	<i>Best linear unbiased estimator</i> (Melhor método de previsão linear imparcial, português)
ESA	<i>European Space Agency</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i> (Índice de vegetação melhorado, português)
FCT	Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia
FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i> (Sistema Global de Navegação por Satélite, português)
GRASS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
MDS	Modelo Digital de Superfície
MP	Material Particulado
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (Índice de vegetação de diferença normalizada, português)
PT-TM06/ETRS89	Sistema de Referência Terrestre Europeu 1989/Portugal TM06
RGB	Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul, português)
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

1. Introdução

Esta dissertação foi elaborada no âmbito do projeto *CoalMine* (FCUP) – Resíduos de exploração de carvão: avaliação, monitorização e recuperação de impactos ambientais através de deteção remota e análise geoestatística [1]. O projeto foi iniciado a 26 de julho de 2018 e finalizado a 25 de julho de 2022, com os objetivos principais de identificar, avaliar e acompanhar os impactos ambientais que decorreram da contínua autocombustão da escombreira da mina de carvão de S. Pedro da Cova, inserida na área da Bacia Carbonífera do Douro [2].

Adicionalmente, este projeto procurou sensibilizar a população local para os riscos inerentes às atividades antrópicas nas proximidades da escombreira e nas áreas de drenagem da mina através de sessões, abertas ao público, para a apresentação dos resultados obtidos decorrentes do seu desenvolvimento [3]. Esta divulgação de resultados esteve, inerentemente, estendida aos tomadores de decisões das autoridades locais por forma a fornecer informações válidas que permitissem a determinação de medidas para a recuperação e mitigação dos impactos ambientais provocados por esta mina na região. O processo contínuo de autocombustão das pilhas de resíduos de carvão é um fator preocupante e extremamente negativo a nível ambiental, pois durante esse processo é produzido um largo espectro de poluentes, tais como compostos orgânicos, oligoelementos tóxicos e material particulado (MP), que depois são mobilizados, sem controlo, para os solos, lençóis freáticos e para o ar, afetando o equilíbrio dos ecossistemas [4].

Devido à sua localização, nas proximidades de infraestruturas de carácter social e de um centro populacional, é fundamental o registo e monitorização dos níveis de atividade no interior das pilhas de resíduos e das características da sua topografia. O estudo e registo de dados da sua evolução permitem avaliar os riscos e impactos causados e aplicar medidas de mitigação apropriadas com base nas informações recolhidas [5] [6].

O Projeto *CoalMine*, financiado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) e com cofinanciamento pelo COMPETE 2020, Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, e Estado Português (Portugal 2020), tem como principais objetivos a identificação e quantificação dos impactos ambientais que resultaram da autocombustão da escombreira da mina de carvão de S. Pedro da Cova, e estudar os impactos a nível social e na saúde da população residente nas proximidades da localização da mina com análises geoquímicas do solo e água, e o estudo das temperaturas superficiais da pilha de resíduos [3].

Um projeto prévio, também realizado em parceria com a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), foi o *ECOAL-MGT*- Gestão ecológica de pilhas de resíduos de carvão [7]. O projeto *ECOAL* teve início em 2013 e terminou em 2015 tendo como objetivo principal a investigação de métodos e planos de gestão ecológica de pilhas e resíduos de carvão, com especial atenção, nomeadamente, para minas em processos de autocombustão e de queima ativa. Este decorreu sobre o processo de monitorização remota da temperatura de combustão e da, conseqüente, emissão de gases atmosféricos. Foi aplicado a partir de metodologias e sistemas de instalação de sensores de fibra ótica que captavam as variações da temperatura do ar à superfície da escombreira e em profundidade. Realizou-se a classificação do material da escombreira e a produção de uma aplicação (*plugin*) em software de código aberto para sistemas de informação geográfica (SIG), que permitiu monitorizar o estado do processo de autocombustão [8].

No âmbito do projeto *CoalMine* e desta dissertação foram publicados três artigos científicos [9] [10] [11].

O presente documento explora os trabalhos, inseridos no âmbito do projeto *CoalMine*, entre julho de 2019 e maio de 2020. Desta forma, todos os dados apresentados dizem respeito à parte intermédia da progressão do projeto, pelo que, os resultados e conclusões discutidos não são representativos de todo o projeto, isto é, apenas refletem o período referido anteriormente. Apesar disso, as conclusões finais do projeto são análogas às do período mencionado (as variações da temperatura superficial estão relacionadas com a temperatura ambiente e/ou exposição solar, no entanto, em zonas específicas, resultante do processo ativo de combustão, as temperaturas à superfície da escombreira em estudo chegam a atingir mais de 50°C independentemente da temperatura do ar ou da estação do ano ocorrente, as análises aos índices de vegetação e uso e ocupação do solo permitem concluir que a vegetação ocorre em zonas com baixas temperaturas e que é de extrema importância para estabilização do solo atrasando os processos de erosão, é comprovada uma tendência de subsidência justificada pelo processo ativo de combustão, adicionalmente, à parte da temática deste trabalho, análises realizadas à composição do solo e lençóis freáticos perto da zona da mina demonstram que os índices de contaminação provenientes da exploração mineira não permitem o uso do solo e água para atividades agrícolas e domésticas) mas estendem-se à totalidade da duração do projeto.

Assim, esta dissertação não é representativa de todo o projeto *CoalMine*, nem de todo o conhecimento científico produzido para este, sob a forma de múltiplas publicações científicas multidisciplinares, que serão devidamente citadas.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo e análise de dados obtidos referentes à temperatura da superfície da escombreira. Adicionalmente foram monitorizados os possíveis movimentos de massa provenientes de deslizamentos ou erosão do solo da escombreira. Paralelamente, procurou-se verificar quais as zonas da pilha de resíduos que impedem o desenvolvimento de vegetação, a partir de análises de dados multiespectrais, algoritmos geoestatísticos e classificação de imagens. Para realizar estes estudos foram recolhidas informações espaciais usando imagens térmicas, modelos digitais de superfície (MDS) e recolhas de dados *in situ*, na área de estudo.

As metodologias de recolha de medições de temperatura da superfície da pilha de resíduos, considerando os constrangimentos e impedimentos de acesso total à área de estudo, foram elaboradas através do uso de sensores com a capacidade de captar temperaturas num Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e o uso de um termómetro infravermelho, neste caso aplicado na recolha de informação *in situ*.

Adicionalmente, procurou-se demonstrar a utilidade e funcionalidade dos SIG para o tratamento, processamento e interpretação de informações geográficas de diferentes fontes recolhidas no terreno. Para facilitar o acesso e análise dos resultados também se procurou criar uma aplicação SIG (*plugin*) com base no software *open source QGIS*. Por forma a implementar este *plugin* foi planeada a sua integração com uma base de dados (criada através da extensão espacial *PostGIS*, também *open source*), criada para o projeto, onde são armazenados todos os dados/resultados obtidos durante o projeto, quer os que são apresentados neste documento, quer outra informação geográfica obtida previamente e outros dados com incidência geográfica, como a análise qualitativa de água e solos.

1.2 Área de estudo

1.2.1 História

Outrora reconhecida como uma região de elevado valor agrícola, a vila de S. Pedro da Cova passa, em 1800, a ser um dos pontos de maior valor na economia industrial do país, quando o interesse e investimento socioeconómico começa a aumentar de escala devido à descoberta e intensiva exploração do carvão mineral [12] [13].

Em 1921 foi inaugurado o Poço de S. Vicente com uma profundidade de exploração de 157 m. O Cavalete do poço, na Fig. 1, construído em 1934 com uma

estrutura de 38,5 m de altura em betão armado, apenas entrou em funcionamento em 1937 [14].



Fig. 1 - Cavalete de S. Pedro da Cova (Monumento de Interesse Publico, março de 2010) [15].

A Companhia das Minas de S. Pedro da Cova, fundada a 1921, foi a responsável pela exploração do couto mineiro até 1970, data de encerramento da mina.

A mina de S. Pedro da Cova foi um dos maiores centros de migração da classe trabalhadora do país, mas nos finais da Segunda Guerra Mundial a exploração mineira do Carvão começou a ser substituída por outros compostos combustíveis como o fuelóleo e o petróleo, de maior acessibilidade económica, uma vez que a necessidade de modernizar as técnicas e equipamentos utilizados por forma a manter a exploração do carvão tornou esta proibitivamente dispendiosa [13].

A Companhia encerrou a 25 de março de 1970, e assim, o edifício fica abandonado durante alguns anos, apenas sendo adquirido pela Junta de Freguesia em 1978, e reconvertido em 1989 para o Museu de S. Pedro da Cova (Fig. 2). Apesar da sua edificação ter sido projetada em 1963-64, pelo Engenheiro Barreiros Leal, o edifício é considerado uma arquitetura pioneira. Este foi desenhado segundo uma estratégia de adaptação ao terreno onde se encontrava e a sua estrutura de betão é incomum para a época. Um dos outros pontos que realça o seu design arquitetónico é a presença de uma escadaria principal que liga os dois pisos, que é valorizada como um elemento escultórico mais do que funcional [16].

Atualmente, a área é reconhecida e valorizada pelo seu passado de exploração mineira a nível turístico, tendo como principais monumentos de interesse o Edifício de tratamento e expedição de Carvão e o Cavalete de S. Vicente, mas resultado dos processos de exploração são as pilhas de resíduos depositados com elevados riscos a nível ambiental e de saúde pública que, devido à localização próxima de centros populacionais, atraem atenção dos locais e das entidades públicas. A mina de S. Pedro da Cova tem sido alvo de inúmeros estudos/projetos científicos em torno da temática de gestão das pilhas de resíduos e dos impactos ambientais [1] [3] [7].



Fig. 2 - Antiga Casa da Malta, agora o atual Museu Mineiro, Vila Verde [16].

A Estátua do Mineiro, na Fig. 3, foi inaugurada a 1 de maio de 2008, como símbolo de uma época de elevada importância para o avanço socioeconómico da região através da exploração mineira, e em homenagem aos trabalhadores mineiros, muitos deles provenientes de outras regiões de Portugal, que operavam sem direitos laborais e sem condições de segurança e higiene [12] [16].



Fig. 3 - Estátua ao Mineiro [17].

Após a ocorrência de incêndios florestais na região, em 2005, a pilha de resíduos (escombreira), criada pela deposição antrópica de materiais não aproveitados da exploração da mina de S. Pedro da Cova, entrou em autocombustão. Este evento foi documentado, como mostra a Fig. 4.



Fig. 4 - Pormenor das camadas profundas da escombreira em autocombustão [18].

No âmbito do Projeto ECOAL durante o estudo e monitorização das temperaturas de combustão superficiais da pilha de resíduos, para além das elevadas temperaturas verificadas também foi possível observar grandes quantidades de enxofre à superfície do solo (Fig. 5). Esta ocorrência alerta para a possibilidade da contaminação de solos e águas como consequência dos processos de autocombustão [7].



Fig. 5 - Enxofre depositado no solo [18].

1.2.2 Enquadramento geográfico e climático

Localizada a norte de Portugal, a cerca de 10 km a leste do Porto, e pertencendo à União das Freguesias de Fânzeres e São Pedro da Cova do Concelho de Gondomar, Distrito do Porto, S. Pedro da Cova é uma vila mineira, onde está localizada a mais importante jazida Carbonífera de Portugal. A freguesia, onde esta vila se encontra inserida, tem como fronteira, a norte o Concelho de Valongo e as freguesias de Baguim do Monte e Rio Tinto, do Concelho de Gondomar, a este os concelhos de Valongo e Paredes, a oeste o Concelho do Porto e a União das Freguesias de Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim e a sul a União das Freguesias de Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim e a União das Freguesias de Foz do Sousa e Covelo, também do Concelho de Gondomar.

A área de estudo faz parte da escombreira, adjacente à mina que explorava a jazida Carbonífera, decorrente da atividade mineira. A escombreira estende-se por uma área de, aproximadamente, 28.000 m² [19]. Neste contexto, a área de estudo foi limitada à zona da escombreira que apresentava maior atividade de processos de

autocombustão, definida previamente no decorrer do projeto ECOAL (latitude: 41°09'26" norte; longitude: 8°30'10" oeste; sistema de coordenadas *World Geodetic System 84* (WGS84)) [7]. Na Fig. 6 está apresentado o enquadramento geográfico da área de estudo da escombreira e da vila de S. Pedro da Cova.

Em termos climáticos, a zona de interesse é classificada, com base na classificação de Köppen-Geiger, como clima Tipo C (temperado), mais especificamente, como Tipo Csb (temperado com verão seco e suave) [20].

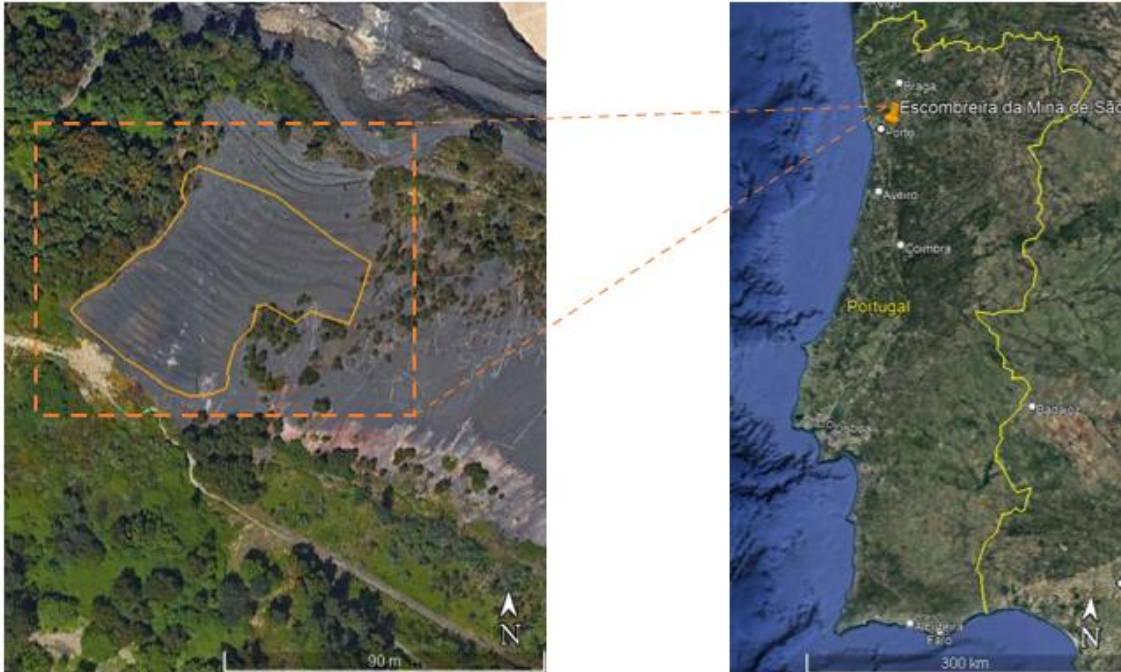


Fig. 6 - Enquadramento geográfico da área de estudo, Escombreira da Mina de S. Pedro da Cova em Portugal.

1.2.3 Enquadramento geológico

O território da área de estudo faz parte da Zona Centro Ibérica do Maciço Ibérico, tendo como estrutura geológica predominante o Anticlinal de Valongo.

Geomorfologicamente, a zona de interesse caracteriza-se por dois conjuntos de formações montanhosas, com origem da erosão diferencial do Anticlinal de Valongo, antifforma assimétrica de direção noroeste-sudoeste, dispendo-se num flanco ocidental e um oriental. O flanco ocidental é composto pelas Serras do Castiçal, Flores e S. Domingos, enquanto, o flanco oriental é formado pelas Serras de Santa Justa, Pias, Santa Iria, Banjas e Boneca [21].

Os estratos presentes neste local têm idades compreendidas entre o Pré-câmbrico e/ou Câmbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico e Carbonífero.

O estrato Carbonífero observado na região está datado ao Ghzeliano inferior. A deposição deste estrato ocorreu, a sudoeste do Anticlinal de Valongo, em bacias intramontanhas [22].

No decorrer do Ghzeliano a sedimentação esteve restringida pela Orogenia Varisca, mais pronunciada em zonas de fratura, levando à constituição de uma bacia (Bacia Carbonífera do Douro) onde ocorreu a deposição do Carbonífero [21].

O carvão explorado na mina de S. Pedro da Cova está depositado em bacias límnicas, adjacentes ao flanco oeste do Anticlinal de Valongo, fazendo parte da Bacia Carbonífera do Douro. Esta Bacia tem um comprimento de 53 km e uma espessura entre 30 m e 250 m, sendo o maior afloramento de depósitos de carvão do Carbonífero em Portugal e por isso o mais importante depósito de carvão do país (Fig. 7 e 8) [23].

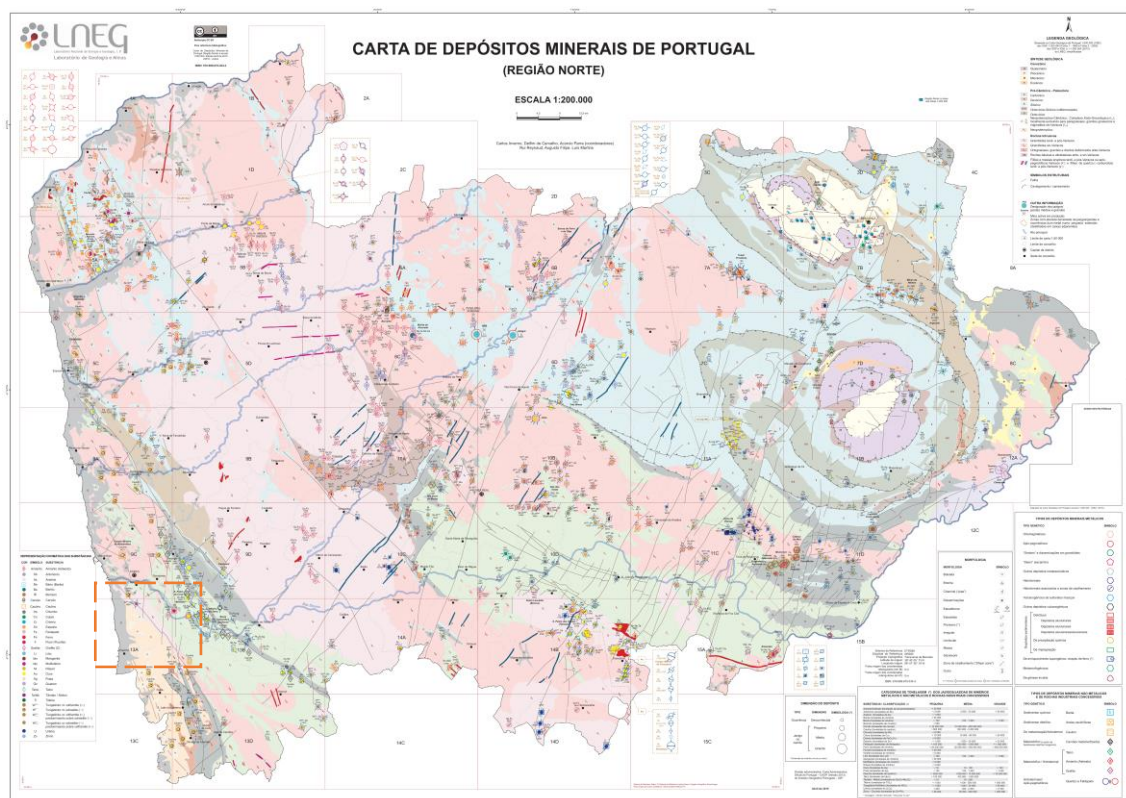


Fig. 7 - Carta de Depósitos Minerais, Região Norte de Portugal, 2019 [24].

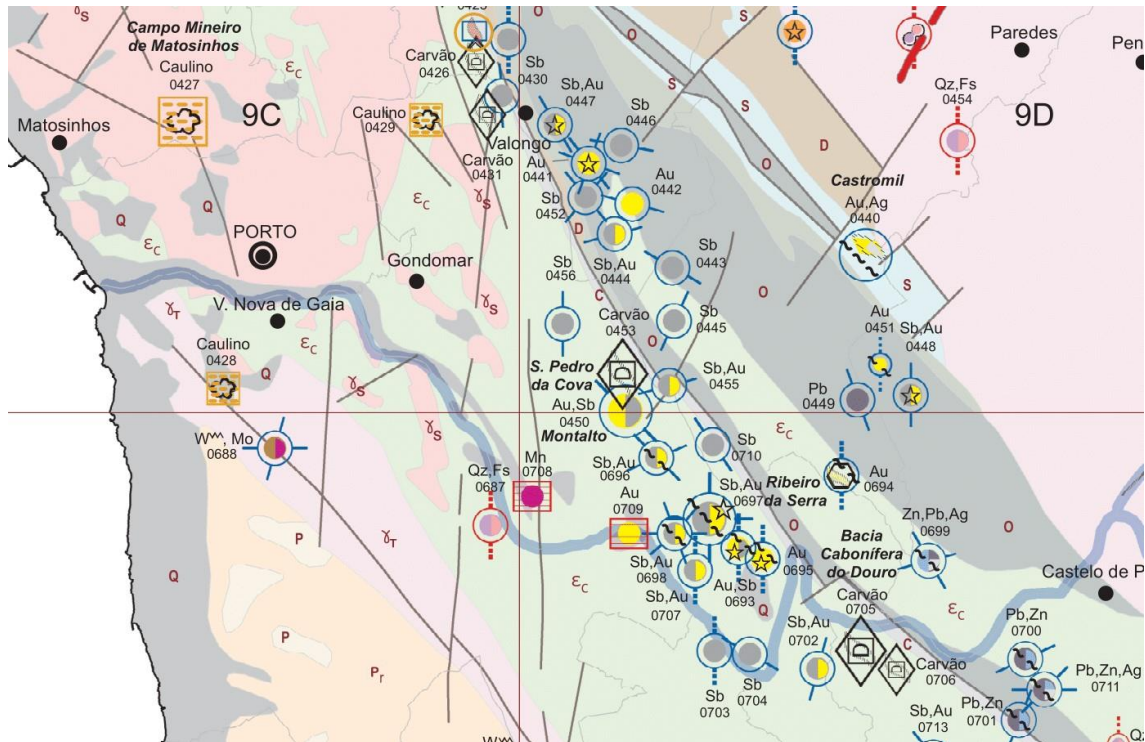


Fig. 8 - Seleção da área de estudo de S. Pedro da Cova, da Carta de Depósitos Minerais, Região Norte de Portugal (Fig. 5), 2019 [24].

2. Conceitos teóricos

Tendo como objetivo final a monitorização ambiental da escombreira de São Pedro da Cova, é necessário esclarecer alguns conceitos teóricos fundamentais que possibilitam uma melhor análise e estudo dos resultados obtidos. É, então, realizado um enquadramento teórico da caracterização do conceito escombreira e do processo de autocombustão, assim como da evolução da técnica de fotogrametria, da evolução e aplicação do método de interpolação geoespacial – krigagem, caracterização do método de classificação de dados não supervisionada e definição dos cálculos de índices de vegetação implementados como ferramenta de análise e monitorização ecossistémico.

2.1 Escombreira e autocombustão

Qualquer que seja a atividade ou processo realizado na indústria mineira é assegurado que irá haver produção de resíduos sejam estes subprodutos sólidos, líquidos ou gasosos. Estes vão sendo acumulados em pilhas de resíduos ou escombreiras, locais onde se acumulam as matérias-primas mineiras sem aproveitamento consequentes de uma exploração mineira nas suas imediações [25].

Estas acumulações de compostos são esquecidas após o término da exploração da mina, devido à impossibilidade de destruição das mesmas ou alteração do local. Consequentemente, torna-se impossível o desenvolvimento ou reaproveitamento destas áreas para outras atividades devido à ausência de condições favoráveis para a instalação e desenvolvimento da vegetação, declives acentuados e presença de compostos nocivos [4].

São numerosos os estudos que procuram resolver os problemas de gestão e manutenção das pilhas de resíduos de exploração mineira devido ao elevado índice de poluição que estas apresentam [26] [27] [28] [29]. A área afetada pela poluição não corresponde apenas à zona mineira, mas ao resultado de acontecimentos como libertação de compostos tóxicos para lençóis freáticos e atmosfera ou até movimentação de solos através de erosão, ou seja, a poluição pode arrastar-se até aos núcleos residenciais das proximidades [4].

O aumento de temperatura do material presente na escombreira, quer por processos intrínsecos ou extrínsecos à mesma, pode levar à ignição desse material que por sua vez sustenta e expande a combustão a materiais adjacentes, iniciando-se a autocombustão. Este processo altera ativamente a composição química dos materiais presentes podendo ocorrer contaminação tanto do solo, como da água e do ar.

A combustão tanto pode iniciar com o processo de oxidação de matéria orgânica e outros compostos residuais, que aumentando gradualmente a temperatura da escombreira origina pontos de ignição; ou pode também estar associada a incêndios florestais que, pela concentração de calor, iniciam um ciclo de queima dos resíduos, que pode ficar ativo durante anos [30]. Este foi o caso de S. Pedro da Cova [19].

2.2 Fotogrametria

“*The science or art of obtaining reliable measurements by means of photography*”, definição de fotogrametria pela Sociedade Americana de Fotogrametria [31].

Os desenvolvimentos durante a Segunda Guerra Mundial levaram à produção em massa de mapas e à necessidade do melhoramento do processo de cartografia, o que levou ao conseqüente desenvolvimento da fotogrametria. No entanto, já em 350 AEC havia o interesse pelo processo de projeção ótica de imagens tendo este sido introduzido por Aristóteles. *Dr. Brokk Taylor* elabora a teoria da perspectiva linear, mas não direcionado para um método de ciência geoespacial. É *J.H Lambert* que explora a teoria anterior como uma estratégia de criação de mapas [32].

Em 1827, *Joseph Niepce* desenvolve o processo de heliografia, conseguindo assim produzir a primeira fotografia mundial, acontecimento que transforma os processos e métodos de recolha de informação visual até aos dias de hoje. O francês *Louis Daguerre* parte do conceito de heliografia, mas melhora a técnica de produção de imagem para uma menos complexa e mais acessível. É na Academia Francesa da Ciência que a técnica da fotografia é apresentada pelo geodesta *Francois Arago*, como um método de processamento de informação topográfica [32].

Apenas anos mais tarde é que são realizadas as primeiras experiências com a aplicação da fotografia para mapeamento topográfico, tentando captar imagens aéreas com auxílio de papagaios e balões, orientadas por *Colonel Aimé Laussedat* em 1849 [32].

Dr. Carl Pulfrich iniciou um processo de sobreposição fotográfica em 1909, no qual este conseguia analisar e medir informações de duas fotografias sobrepostas, com auxílio de instrumentos de observação estereoscópica, o que permitiu um avanço nas técnicas de fotogrametria [33]. Em 1913 são realizados os primeiros voos para recolha de fotografias aéreas com o objetivo de produção de peças cartográficas [34].

É com o auxílio do avião e com o decorrer da Primeira Guerra Mundial que as fotografias são valorizadas como uma peça fundamental no conhecimento do território. Na Segunda Guerra Mundial as produções de mapas cartográficos por técnicas de

fotogrametria aérea estabelecem-se rapidamente como um método eficiente de levantamento de informação topográfica.

Após a Segunda Guerra Mundial, e com os avanços da tecnologia os métodos de fotogrametria são reformulados. *Von Gruber* designa este método de imagem como uma “arte de evitar cálculos”, os métodos matemáticos teriam de se restringir às técnicas analógicas devido às limitações de acesso a um computador [34].

Nos anos 50 o fotogrametrista *Hellmut Schmid*, já com auxílio de um computador, procura melhorar as técnicas de captura de imagem e ajustar as medidas fotogramétricas, e desenvolve o princípio da fotogrametria analítica. Nos finais dos anos 50, *Uuno Helava* inventa o *plotter* analítico, mas é apenas nos finais dos anos 70 que os instrumentos estão disponíveis para uso geral [35].

A partir dos anos 60, *Friedrich Ackermann* continua o desenvolvimento e aperfeiçoamento das medidas da fotogrametria, e elabora um conceito de programa com modelos independentes, teoria iniciada por *Duane Brown*, pioneiro na programação de ajuste de medições, sendo este introduzido em finais dos anos 60.

A definição da ciência de produção de mapas através de fotografias foi introduzida por *Albrecht Meydenbauer*, um arquiteto prussiano, que com influência dos estudos prévios realizados em especial de *Aimé Laussedat*, aperfeiçoa o método o qual define por “*Iconométrie*” [35]. Pela primeira vez o termo é publicado num jornal semanal da Associação dos Arquitetos de Berlim em 1867 segundo o título “*Die Photometographie*”, simplificado anos mais tarde para “*Photogrammetrie*”, derivado das palavras gregas *photos*, *gramma* e *metron*, que significa “medição gráfica através da luz” [36].

Com o avanço das tecnologias e a globalização informática, também as técnicas de produção de cartografia dão um impulso inovador que acompanha essas exigências de produção em massa com uma visão mais moderna de rigor, rapidez e facilidade de aquisição, processamento e divulgação da informação topográfica. A fotogrametria digital contraria as etapas anteriores partindo do uso de imagens digitais em vez das fotografias analógicas [37].

A fotogrametria é então um método científico e tecnológico de medições de informações métricas a partir da análise e interpretação de fotografias, das quais se extrai a forma, dimensão e a posição geoespacial dos objetos.

Na prática são utilizados instrumentos para a produção de fotografias aéreas digitais, *software* de recolha e processamento de dados em sistemas de coordenadas geoespaciais e estações fotogramétricas que servem como referência e pontos de controlo para que seja possível obter os valores mais precisos e aproximados da realidade.

Estes instrumentos podem ser categorizados em relação à sua posição base de recolha de informação por fotogrametria a curta-distância quando o objeto a analisar e a câmara se encontram próximos, sendo este método aplicado em áreas mais específicas e onde os dados a recolher são de menor escala. Fotografia terrestre, sendo que neste caso a captura de imagem é realizada *in situ*, fotogrametria aérea, quando a recolha de dados é realizada por uma câmara de precisão incorporada num veículo aéreo, e fotografia espacial referente a todas as ocorrências de captura de imagens através de uma câmara inserida num satélite artificial [38].

2.3 Método geoestatístico – Krigagem

Krigagem, derivado do termo *kriging*, é um método de interpolação geoespacial reconhecido globalmente como um dos melhores métodos de previsão linear imparcial, do inglês *best linear unbiased estimator* (BLUE), valorizado pela capacidade de minimizar os erros de interpolação de uma amostra [39].

Daniel Krige, autor do método denominado *kriging*, desenvolveu uma metodologia estatística empírica de previsão dos níveis de concentração de ouro e outros metais em minérios através de uma base de dados espaciais (Minas do Sul de África, 1951-66). *Pierre Carlier* introduz o termo *krigeage*, que é traduzido para o inglês *kriging* em 1963-65 com *Georges Matheron*, que explora a teoria na sua dissertação de doutoramento. *Herman Wold* (1938), *Andrey Nikolaevich Kolmogorov* (1939-41) e *Norbert Wiener* (1949) são alguns autores que também se aproximaram do conceito *kriging*, mas nestes casos direcionam-se para o processamento temporal e não para a vertente espacial [40].

Atualmente, o método tem sofrido divergências, destacando-se dos métodos matemáticos de interpolação do início do séc. XX. Numa estratégia de resolver os problemas das ciências do ambiente nas áreas de engenharia petrolífera e mineira, problemas biológicos, ecológicos e climáticos, mas também sociais como controlo de poluição e saúde pública, é explorada a capacidade metodológica de este reconhecer a importância da variação espacial representada num variograma [41].

Existem vários tipos de métodos de *kriging*. Estes são específicos para a sua aplicação em diferentes cenários ou programações como modificações nos pesos ou alterações nas configurações da amostra ou até mesmo nos parâmetros dos variogramas que refletem as mudanças das previsões de interpolação [39].

2.4 Classificação não supervisionada

Os algoritmos de classificação não supervisionada são capazes de identificar e agrupar classes (como “*clusters*”), neste caso tipos de cobertura de solo, através de padrões na resposta espectral dos dados utilizados na classificação.

Neste tipo de classificação, são tipicamente implementados métodos de agrupamento para a formação de *clusters*, com base na semelhança das assinaturas espectrais dos dados [42].

O processo de agrupamento em *clusters* pode ser hierárquico, onde os *clusters* seguem a morfologia de *clusters* já existentes, divisório, no qual parte de um *cluster* unificado e procede à divisão em agrupamentos mais pequenos, ou, o oposto, um processo aglomerativo, em que o agrupamento parte de *clusters* individuais e isolados que vão sendo unificados com *clusters* de informação semelhante.

O algoritmo *K-means clustering*, como ferramenta de análise do *software Sentinel Application Platform* (SNAP) da Agência Espacial Europeia, tem a capacidade de associar, na imagem, cada pixel ao *cluster* que tenha a distância mais próxima (distância euclidiana), e pela simplicidade da formatação consegue processar bases de dados com tamanhos elevados, repetindo uma sequência hierárquica de criação de classes até os pixels já não apresentarem variações entre dois *clusters* ou for atingido o número máximo pretendido [43].

2.5 Índices de vegetação

O Índice de vegetação de diferença normalizada, traduzido de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), é um rácio normalizado que utiliza as bandas do infravermelho e do vermelho, como forma de avaliar a concentração de clorofila na vegetação, bastante utilizado como uma ferramenta de análise de monitorização e planeamento de gestão de ecossistemas [44].

Reconhece-se que cada espécie vegetal em boas condições fitossanitárias possui uma assinatura espectral muito característica. Este índice permite estimar o estado de saúde de cada espécie vegetal, remotamente, através dos valores de reflectância da luz solar [45].

Oscilações negativas nos valores médios do NDVI são indicadores de deterioração do estado fitossanitário, isto quando não é associado a alterações da morfologia de cada espécie de vegetação, como intervenções de plantação ou remoção dos mesmos indivíduos.

A equação 1 representa o cálculo do NDVI em que o NIR corresponde à luz refletida na banda espectral infravermelha e RED à luz refletida na banda espectral vermelha.

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

A diferença do NDVI é expressa como uma variação entre -1 a 1. Valores mais próximos do -1 indicam que a luz refletida é maioritariamente visível, ou seja, é um indício de que os elementos de vegetação são ausentes, escassos e/ou em condições fitossanitárias enfraquecidas. Quando o coberto vegetal é denso e se encontra num estado de saúde estável a reflexão de luz encontra-se na banda espectral infravermelha correspondendo a valores positivos mais próximos de 1 [46].

O Índice de vegetação melhorada, do termo *Enhanced Vegetation Index* (EVI) [47], calculado com a equação 2 (Coeficientes: G – Fator de ganho; C1 e C2 – Coeficientes de resistência atmosférica; L – Ajuste do fundo da copa, isto é, compensa a transferência de radiação através da copa),

$$EVI = G \times \frac{(NIR-RED)}{(NIR+C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)} \quad (2)$$

resulta de uma modificação do NDVI, em que é otimizada a recolha de informação da reflexão de luz em situações de condições atmosféricas menos favoráveis, distúrbios na envolvente, como por exemplo ruído de fundo ou até mesmo a capacidade de interpretar melhor e adquirir os dados de coberturas vegetais mais densas e diversas. Nessas situações, o NDVI não tem a capacidade de avaliar essa complexidade de informação sendo mais genérico do que o EVI [48].

De forma análoga ao NDVI, o valor do EVI tem como intervalo de valores -1 a +1, e quanto mais próximo de 1 em melhor estado (mais saudável) se encontra a vegetação.

Apesar de próximos, estes dois índices têm diferentes interpretações. Enquanto o NDVI é mais sensível à clorofila, e por isso mais indicado para a sua análise, o EVI é mais apropriado para analisar as variações nas estruturas das plantas como tipos de folha e fisionomia. Em estudos gerais de deteção de alterações da vegetação e do estado fitossanitário estes índices complementam-se [44].

3. Metodologias

Tendo em conta os objetivos propostos, foram aplicadas variadas metodologias. Por forma a monitorizar a evolução das variações de temperatura foram aplicados métodos de recolha de dados térmicos *in situ* e com uma câmara infravermelho em voos de um VANT. A obtenção da informação sobre o uso e ocupação do solo, através de classificação não supervisionada, para a região em questão tinha como objetivo relacionar a existência ou não, de vegetação com as temperaturas do solo no local. Com o objetivo de avaliar o estado fitossanitário de cada espécie vegetal existente no local implementou-se o cálculo de dois índices de vegetação (NDVI e EVI). Adicionalmente, foi criada uma base de dados e aplicação SIG com o fim de facilitar e agilizar o processamento, interpretação e análise integrada dos diferentes dados.

3.1 Metodologia de aquisição de dados *in situ*

No dia 4 de dezembro de 2019, fez-se uso do recetor de Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems - GNSS*), *Trimble R6* (com precisão horizontal de ± 10 mm e vertical de ± 20 mm no modo *Real Time Kinematic* (RTK) para determinar as coordenadas geográficas (no Sistema de Referência Terrestre Europeu 1989/Portugal TM06 (PT-TM06/ETRS89)) de 55 pontos à superfície da escombreira cuja temperatura foi determinada por um termómetro infravermelho térmico (Fig. 9).

As medidas de temperatura foram realizadas com o termómetro *Electronic Temperature Instruments Ltd. Raytemp 4* que possui uma lente 9:1 e emissividade fixa de 0.95. A precisão deste instrumento é de $\pm 1^\circ\text{C}$ para uma gama de temperaturas entre 0°C e 65°C . As medições foram efetuadas a uma distância do solo de 45 cm o que resultou numa incidência à superfície de 5 cm.

Procurou-se uma distribuição uniforme de pontos por forma a cobrir o máximo possível da área da escombreira, sendo que o elevado declive da área de estudo impossibilitou o acesso de toda a sua extensão.



Fig. 9 - Recolha de dados *in situ*.

3.2 Campanhas de voos – Ortomosaicos, modelos digitais de elevação e mapas de exposição e declive

Foram realizadas três campanhas de voos com um VANT: a 23 de julho de 2019, 30 dezembro de 2019 e 7 maio de 2020, sendo que, nesta dissertação, o terceiro voo foi usado apenas para produzir e comparar os modelos digitais de superfície (MDS).

Cada campanha envolveu três voos, com cada voo a recolher dados de diferentes câmaras, nomeadamente, câmara fotográfica a cores, *Red*, *Green*, *Blue* (RGB, em português vermelho, verde, azul), câmara térmica no espectro infravermelho e câmara multiespectral. Na Tabela 1 são apresentadas as características dos planos de voo criados para cada câmara, realizados mantendo constante a altitude referida em relação ao ponto de partida do VANT, neste caso localizado no topo da escombreira.

Tabela 1 - Especificações aplicadas as câmaras na altura do voo.

Tipo de Câmara	Altitude VANT (m)	Sobreposição longitudinal (%)	Sobreposição lateral (%)
Térmica	100	75	75
RGB	150	70	70
Câmara multiespectral	140	75	75

A área coberta pelos planos de voo excedia os limites da escombreira, por isso todos os resultados obtidos dos voos foram limitados a determinada área, da escombreira, correspondente à que apresentava maior atividade de autocombustão, determinada durante o projeto ECOAL que precedeu o projeto *CoalMine*.

Em cada campanha de voos foram recolhidos pontos de controlo no terreno para correção fotogramétrica, com o recetor GNSS *Spectra Precision SP60* (com precisão horizontal de ± 8 mm e vertical de ± 15 mm no modo RTK), obtidos no sistema PT-TM06/ETRS89. Estes pontos de apoio fotogramétrico foram definidos e materializados no terreno previamente aos voos de modo a serem visíveis pelas câmaras a bordo do VANT e procuravam ter uma dispersão de maneira a abranger todo o plano de voo, de forma que um mesmo ponto fosse visível em diferentes imagens. A cada imagem também foram associadas as coordenadas PT-TM06/ETRS89. Estes pontos permitiram, após processamento fotogramétrico com os dados recolhidos durante os voos, criar mapas georreferenciados e contínuos da superfície (ortomosaicos), para cada sensor, referidos ao sistema PT-TM06/ETRS89.

O referido processamento fotogramétrico foi realizado através dos algoritmos internos do *software Agisoft Metashape* e estendido aos três tipos de dados recolhidos das três diferentes câmaras, tendo sido criados ortomosaicos para cada um deles. Com as imagens recolhidas pelo sensor fotográfico, para além dos ortomosaicos, também foi gerado, fazendo uso de funções do mesmo *software*, um MDS para cada campanha de voos. Os MDS obtidos foram utilizados como *input* nos algoritmos *slope* e *aspect* do *software ArcMap* obtendo-se, respetivamente, mapas de declive e orientação de vertentes.

3.3 Implementação de métodos geoestatísticos

Os 55 pontos mencionados previamente na metodologia *in situ*, permitiram, pelo método geoestatístico de krigagem comum (*ordinary kriging*), criar um mapa de temperatura, contínuo para toda a extensão da escombreira, georreferenciado no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89.

A referida krigagem foi obtida com o algoritmo *Ordinary Kriging* da biblioteca *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA) [49].

3.4 Classificação não supervisionada

Por forma a obter um mapa de uso e ocupação de solo para a área de estudo, os dados multiespectrais recolhidos durante os voos foram processados com o algoritmo *K-Means Cluster Analysis Operator*, versão 1.0, do SNAP, versão 7.0, da *European Space Agency* (ESA).

Devido à zona de interesse apresentar pouca diversidade de classes, existindo apenas o material da escombreira e vegetação, o algoritmo foi implementado de modo a gerar entre duas a três classes (uma classe solo e uma classe vegetação quando é feita a classificação para duas classes e uma classe solo e duas classes vegetação para classificação implementada para três classes) obtendo-se dois mapas referentes a cada situação.

3.5 Índices de vegetação – NDVI e EVI

Para além da análise do uso e ocupação do solo, as imagens recolhidas pela câmara multiespectral permitiram gerar mapas de índices de vegetação, por forma a determinar o estado fitossanitário das espécies vegetais presentes na área da escombreira.

Para tal, foram implementadas as fórmulas do cálculo respetivo a cada índice mencionado e descrito anteriormente com a ferramenta *raster calculator* do *software ArcMap* e aplicadas às bandas multiespectrais de interesse.

No caso do cálculo do índice EVI foram implementados os coeficientes aplicados ao sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) devido à correspondência entre o espectro de bandas deste sensor e o espectro das bandas da câmara multiespectral. Nesse sentido, os coeficientes adotados foram: $L=1$, $C1=6$, $C2=7.5$ e $G=2.5$.

3.6 Base de dados e aplicação SIG

Foi criada uma base de dados relacional com a extensão *PostGIS 3.0* do Sistema de Gestão de Bases de Dados *PostgreSQL 12.1* que foi armazenada localmente [50].

Todos os diferentes tipos de dados gerados pelo projeto *CoalMine*, existentes previamente à criação da base de dados foram incluídos nesta base de dados, entre os quais, as análises geoquímicas de solos e água, os ortomosaicos, os MDS e os mapas de uso e ocupação do solo.

A importação para a base de dados de dados vetoriais no formato *shapefile* foi elaborada com a ferramenta *PostGIS Shapefile Import/Export Manager 3.0.0* do *PostGIS 3.0*. As informações alfanuméricas existentes em formato *excel* foram importados para a base de dados com o software *QGIS 3.10* através de uma ligação entre este e a base de dados. Os dados existentes em formato *raster* foram importados para a base de dados com o algoritmo *raster2pgsql* do *PostGIS 3.0*.

Para além da importação dos dados, é importante relacionar a diferente informação existente na base de dados de modo a otimizar a eficiência computacional da mesma. Isto foi conseguido através de uma conexão entre informações idênticas presentes em dados diferentes.

A base de dados foi integrada numa aplicação SIG, denominada *Coal Mine*, criada com base na linguagem de programação *Python*, no ambiente informático do software *QGIS 3.10*. Esta aplicação foi desenvolvida para exibir uma interface gráfica que permita ao utilizador agilizar a metodologia de processamento, interpretação e análise integrada dos diferentes tipos de dados envolvidos no projeto. Para tal, fez-se uso da ferramenta *Qt Designer* do software *QGIS 3.10*, que permite criar uma interface gráfica constituída por diferentes *widgets* (caixas de diálogo, janelas, botões, etc.), inserções de dados e diferentes algoritmos implementáveis à informação geográfica presente na base de dados [51].

4. Equipamento e *software* utilizados

4.1 Equipamento

Durante a realização deste projeto, o equipamento utilizado para a realização das campanhas de voo foi o VANT *Phantom 4 Pro* da marca *DJI*, apresentado na Fig. 10.



Fig. 10 - *Phantom 4 Pro* [52].

Para a recolha das imagens RGB foi usada a câmara original nativa do VANT. No caso dos dados multiespectrais a câmara implementada, acoplada ao VANT, foi a *Micasense RedEdge*, ilustrada na Fig. 11.



Fig. 11 - *Micasense RedEdge* [53].

A obtenção dos dados térmicos foi conseguida com a câmara *FLIR Vue Pro R*, também esta incorporada no VANT, e apresentada na Fig. 12.



Fig. 12 - FLIR Vue Pro R [54].

Os equipamentos utilizados durante a metodologia *in situ*, foram o termómetro infravermelho *Raytemp 4* da marca *Electronic Temperature Instruments Ltd*, para a determinação da temperatura da superfície da escombreira, instrumento apresentado na Fig. 13.



Fig. 13 - *Electronic Temperature Instruments Ltd. Raytemp 4* [55].

Para o levantamento das coordenadas geográficas dos pontos de interesse foi utilizado o recetor GNSS *Trimble R6*, exposto na Fig. 14.



Fig. 14 - Trimble R6 [56].

Na Tabela 2 estão apresentadas várias características inerentes a cada uma das câmaras usadas no processamento fotogramétrico, uma vez que definem alguns dos parâmetros necessários para a implementação dos algoritmos do *software Agisoft Metashape*.

Tabela 2 - Especificações para cada modelo de câmara.

Especificações	Câmara RGB <i>DJI Phantom 4 Pro</i>	Câmara Multiespectral <i>Micasense RedEdge</i>	Câmara Infravermelho <i>FLIR Vue Pro R</i>
Resolução (MP)	20	1.2	0.33
Tamanho de imagem (pixéis)	5472 por 3648	1280 por 960	640 por 512
Tamanho de pixel do sensor (mm)	0.0024	0.00375	0.017
Tamanho do sensor (mm)	12.8 por 7.2	4.8 por 3.6	10.9 por 8.7
Distancia Focal(mm)	8.8	6	13
Banda Espectral (μm)	0.4 até 0.7	*Informação na Tabela 3	7.5 até 13.5
Peso do sensor(g)	Sem informação	180	113

As bandas espectrais recolhidas pela câmara multiespectral estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das bandas espectrais da câmara multiespectral, *Micasense Red Edge*.

Número de banda	Identificação	Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda do comprimento de onda (nm)
1	Blue	475	20
2	Green	560	20
3	Red	668	10
4	Near infrared	840	40
5	Red edge	717	10

4.2 Software

Os fluxos de trabalho apresentados nesta dissertação envolveram vários tipos de *software* associados à fotogrametria, processamento de imagem, SIG e bases de dados relacionais, nomeadamente:

- *Agisoft Metashape*
- *Esri ArcMap*
- *QGIS*
- *European Space Agency (ESA), Sentinel Application Platform (SNAP)*
- *PostGIS*

5. Resultados e discussão

A Fig. 15 apresenta o ortomosaico RGB obtido do processamento das imagens recolhidas a 23 de julho de 2019 e limitado à extensão da escombreira, onde é possível visualizar a morfologia e o aspeto superficial da área de interesse.

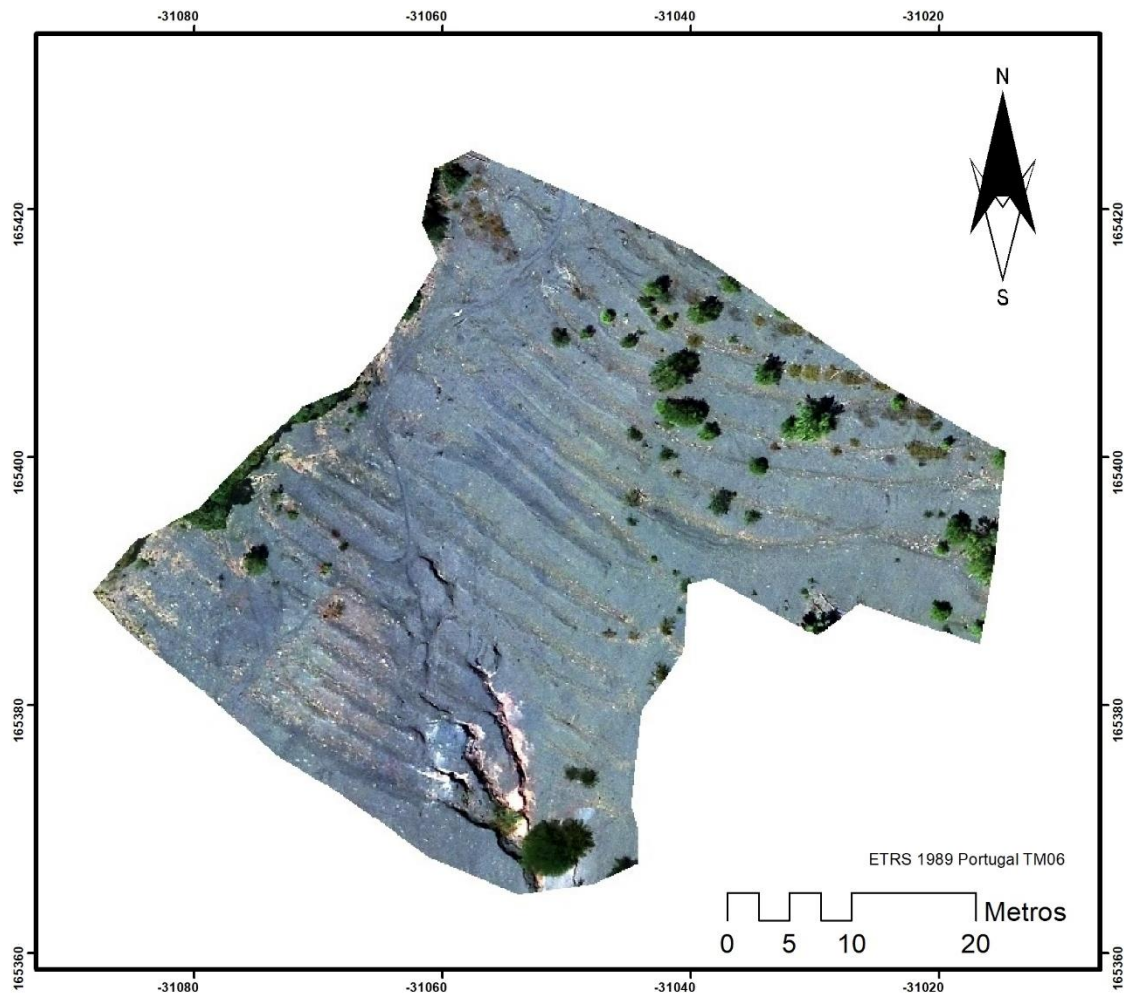


Fig. 15 - Ortomosaico produzido com os dados RGB recolhidos durante o voo de 23 de julho de 2019.

A Fig. 16 ilustra o ortomosaico gerado para o voo de 30 de dezembro de 2019, e permite uma comparação visual de alterações temporais que refletem a dinâmica geomorfológica do local.

Em ambos os ortomosaicos, comprova-se a reduzida e esparsa presença vegetação. Adicionalmente, na comparação visual é aparente a inexistência de novas estruturas vegetais, assim como, o reduzido desenvolvimento das espécies vegetais.

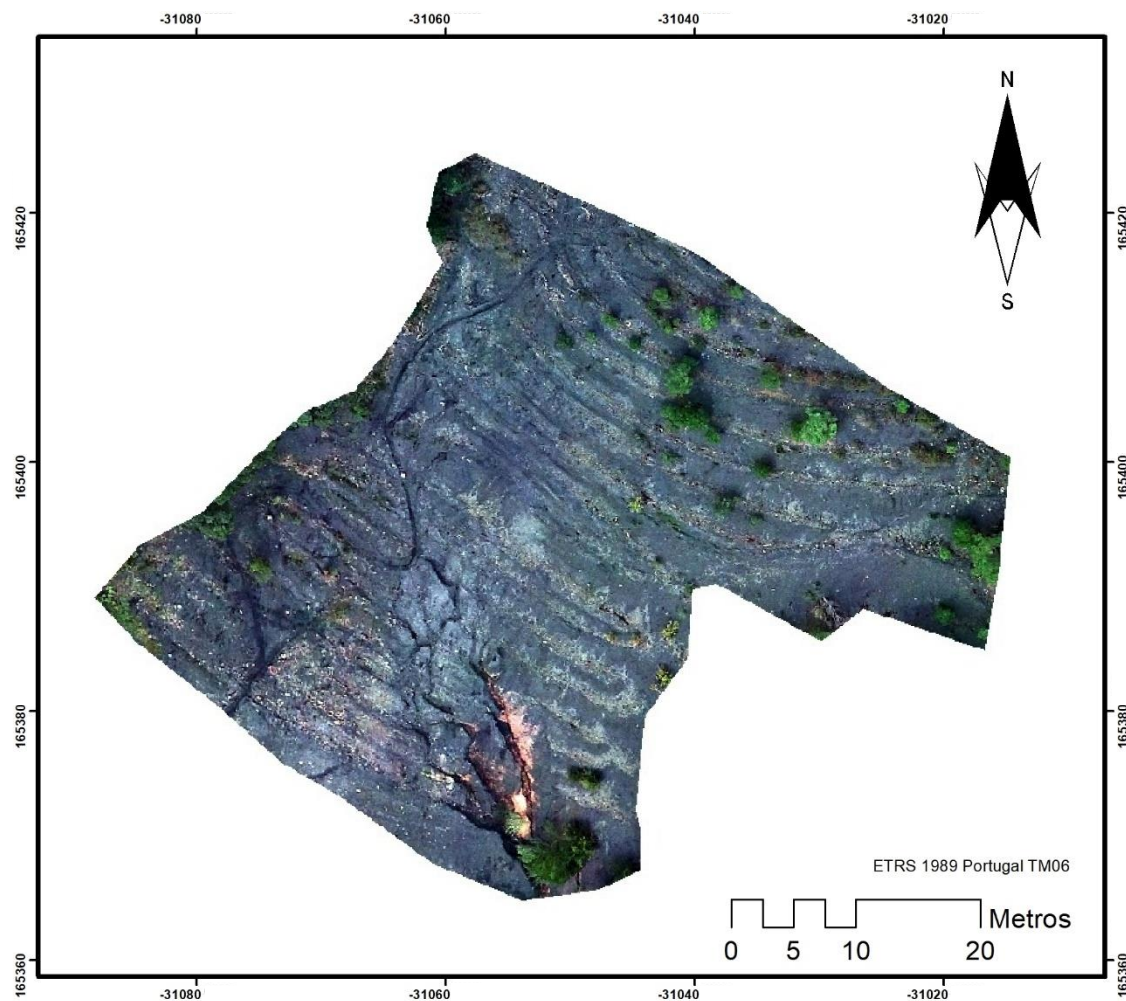


Fig. 16 - Ortomosaico produzido com os dados RGB recolhidos durante o voo de 30 de dezembro de 2019.

Por forma a demonstrar as dificuldades inerentes ao acesso e deslocação na zona de interesse foi criado um mapa de declives da escombreira, apresentado na Fig. 17.

A Fig. 17 permite observar a estrutura em socalcos da escombreira, onde plataformas de declive menos acentuado dão lugar a taludes com variações de elevação extremamente elevadas.

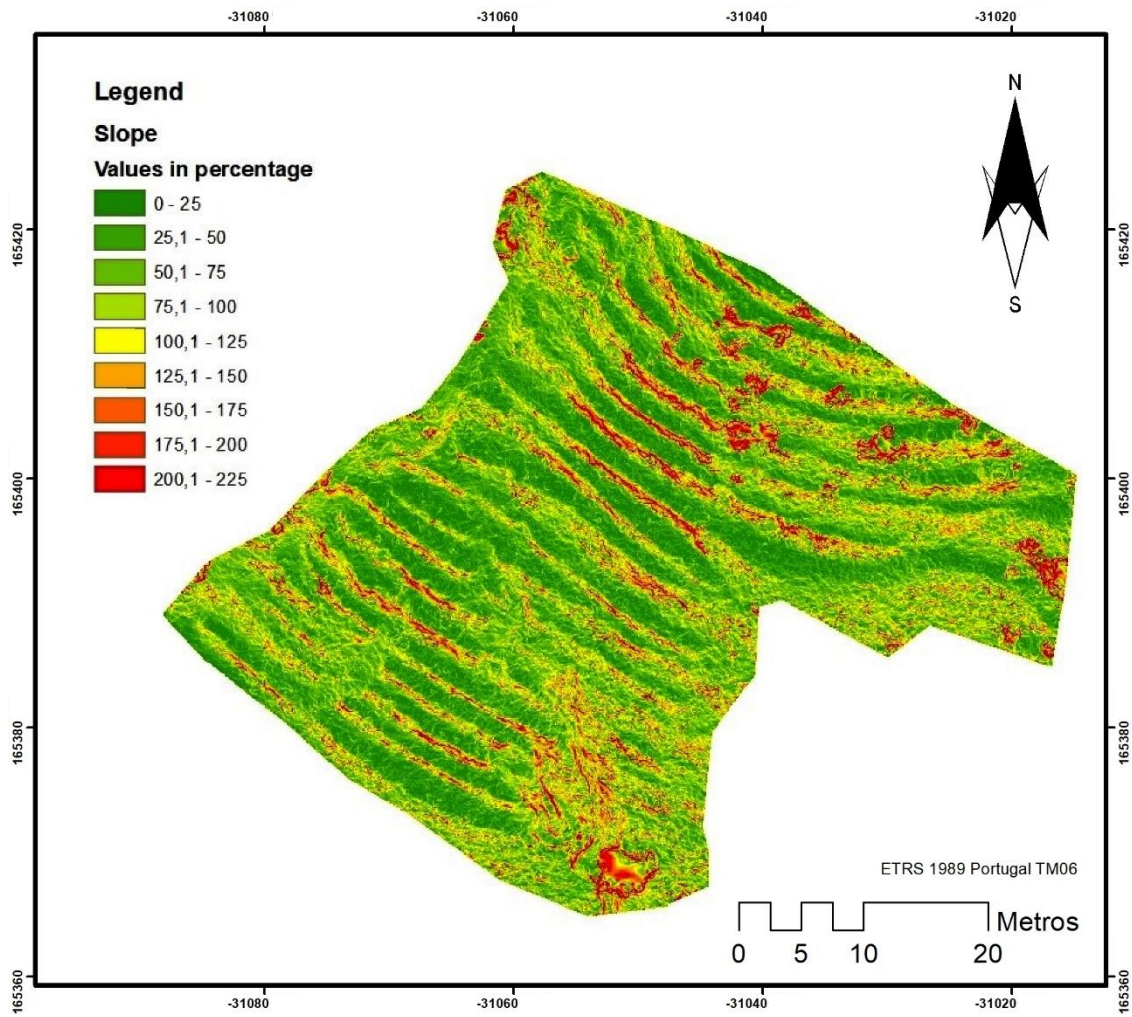


Fig. 17 - Mapa de declives da escombreira.

Adicionalmente, para determinar possíveis influências nas medidas de temperatura pela exposição solar foi considerada a orientação da escombreira. Na Fig.18 está representado o mapa de orientação obtido para a zona mencionada.

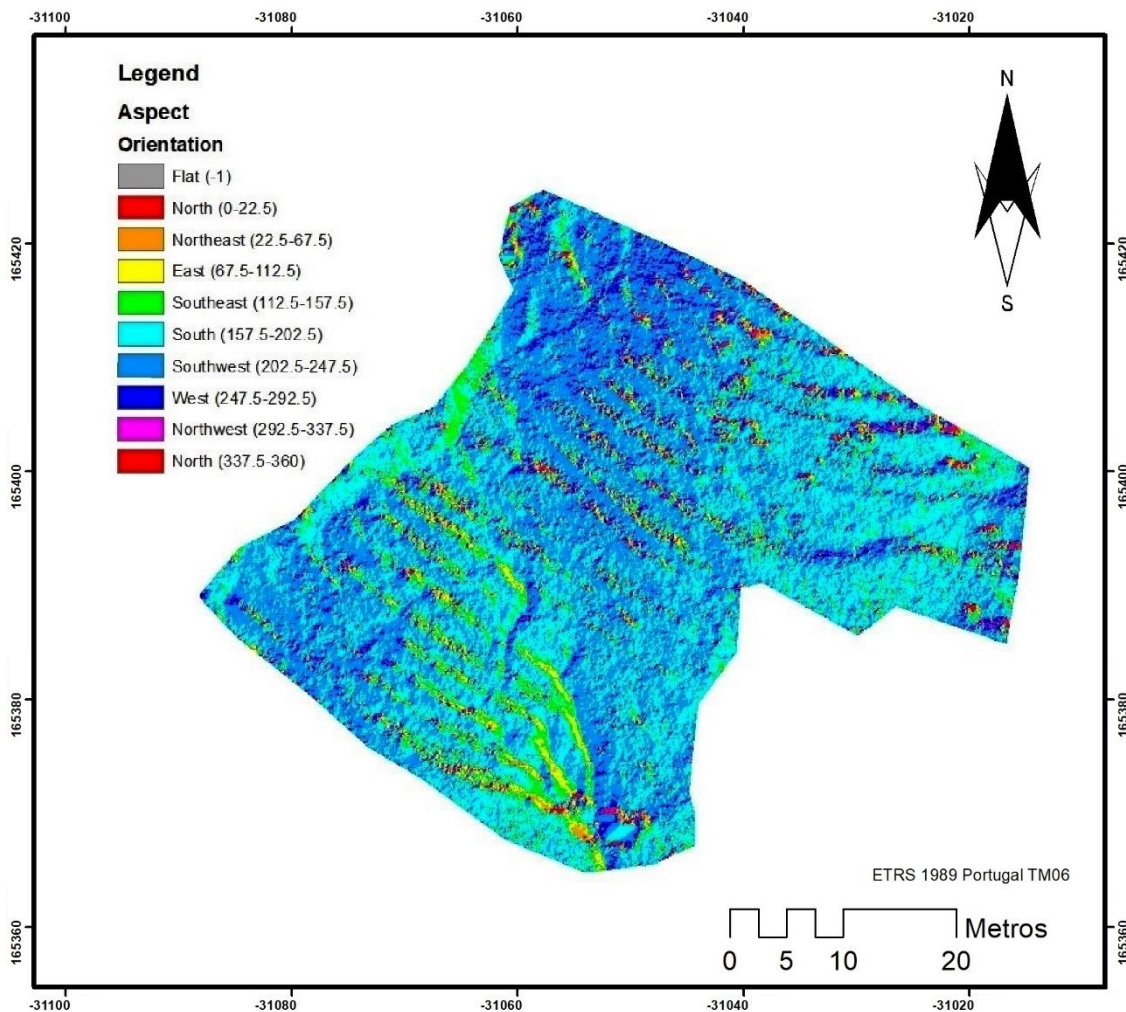


Fig. 18 - Mapa de orientação da área de estudo.

Os mapas de declives e orientação permitiram uma análise estatística das suas características. Para isso, foram calculados os valores máximo e mínimo dos pixéis representados, quando aplicável, assim como a sua média e desvio padrão, valores esses apresentados na Tabela 4. Esta avaliação estatística justificou e validou o uso do VANT para a recolha de dados em áreas de difícil acesso, como a área de estudo deste projeto, uma vez que não obriga à deslocação ao local onde se pretendem recolher medições.

Para além disso, foi possível determinar que a escombreira se encontra voltada a sul, comprovando-se que recebe exposição solar durante quase toda a manhã e parte da tarde.

Tabela 4 - Análise estatística do declive e orientação da escombreira.

	Declive (%)	Orientação (°)
Mínimo	0.05	Não aplicável
Máximo	Não aplicável	Não aplicável
Média	76.99	200.40 (sul)
Desvio Padrão	68.15	49.58

Para analisar a temperatura à superfície da área de interesse, assim como determinar a existência e localização dos pontos mais quentes, ou seja, dos pontos onde a temperatura é mais elevada que nas suas imediações, foi gerado um ortomosaico térmico, apresentado na Fig. 19 (em cima), com os dados recolhidos durante o voo de 23 de julho de 2019.

Com o voo realizado a 30 de dezembro de 2019 também foi possível obter um ortomosaico térmico, exposto na Fig. 19 (em baixo), que permitiu efetuar comparações com o mapa obtido no voo anterior, sendo observado que os pontos mais quentes são comuns aos dois ortomosaicos.

Ambos ortomosaicos foram gerados com captações da câmara *FLIR Vue Pro R*, sendo que a conversão dos dados radiométricos, recolhidos pela câmara, foi efetuada pelo *software* do fabricante, de tal forma foram exportadas as imagens com a informação da temperatura em graus Celsius.

Globalmente, as diferenças notórias entre os dois ortomosaicos térmicos relacionam-se principalmente com a temperatura ambiente durante a recolha de dados, isto é, na generalidade, as temperaturas medidas foram mais baixas no voo de 30 de dezembro (temperatura do ar entre 6°C e 17°C) por comparação com o de 23 de julho (temperaturas ambientais entre 16°C e 20°C) devido à menor temperatura ambiente e radiação incidente.

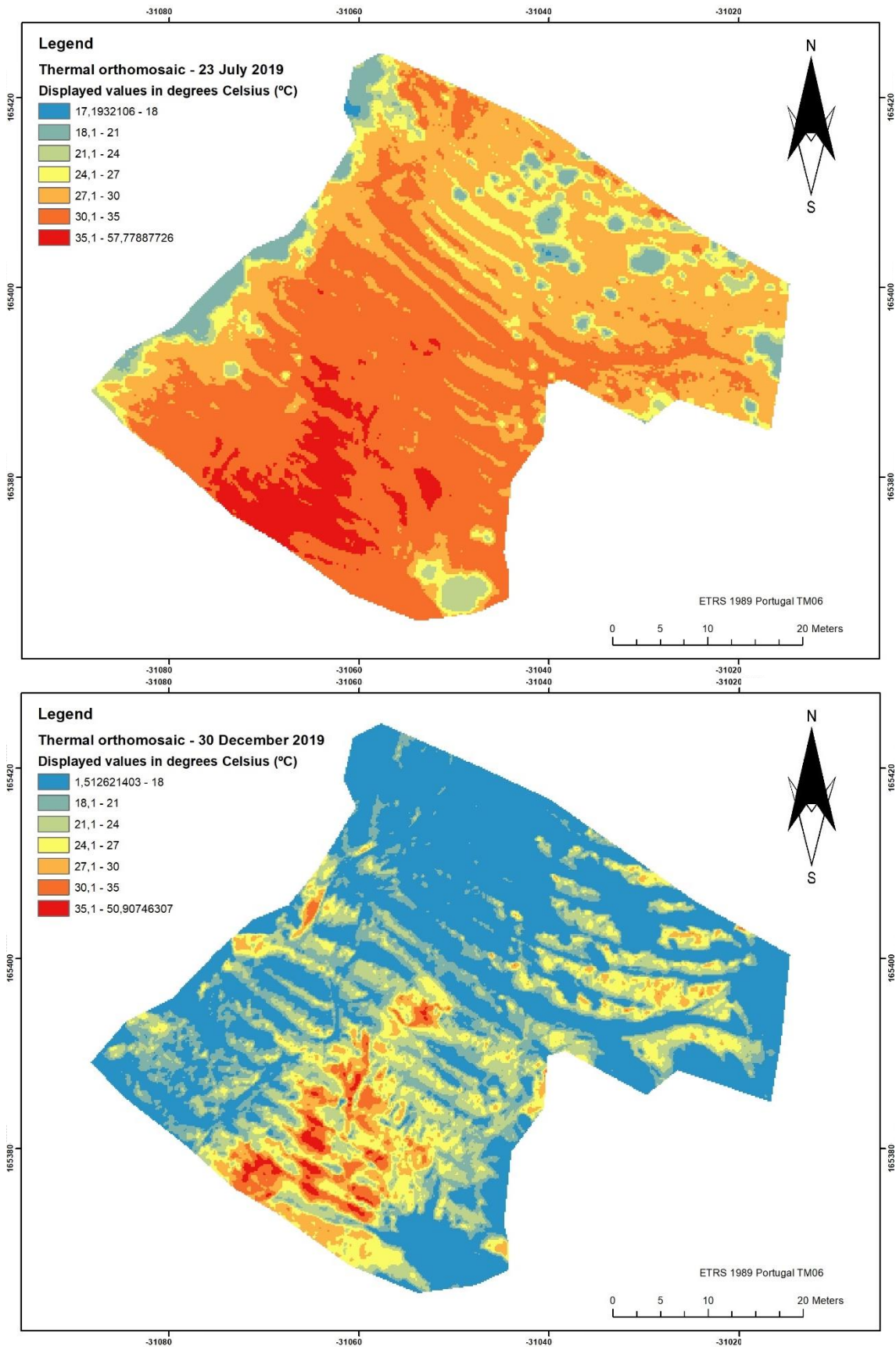


Fig. 19 - Ortomosaico térmico produzido com dados levantados durante o voo de 23 julho de 2019 (em cima) e Ortomosaico térmico produzido com os dados recolhidos no voo de 30 dezembro de 2019 (em baixo).

Complementarmente aos ortomosaicos térmicos, também teve relevância a comparação entre estes e os resultados obtidos da interpolação pelo método de krigagem, ilustrado na Fig. 20, sendo novamente observável os pontos com temperatura mais elevada correlacionados com os obtidos nos ortomosaicos térmicos.

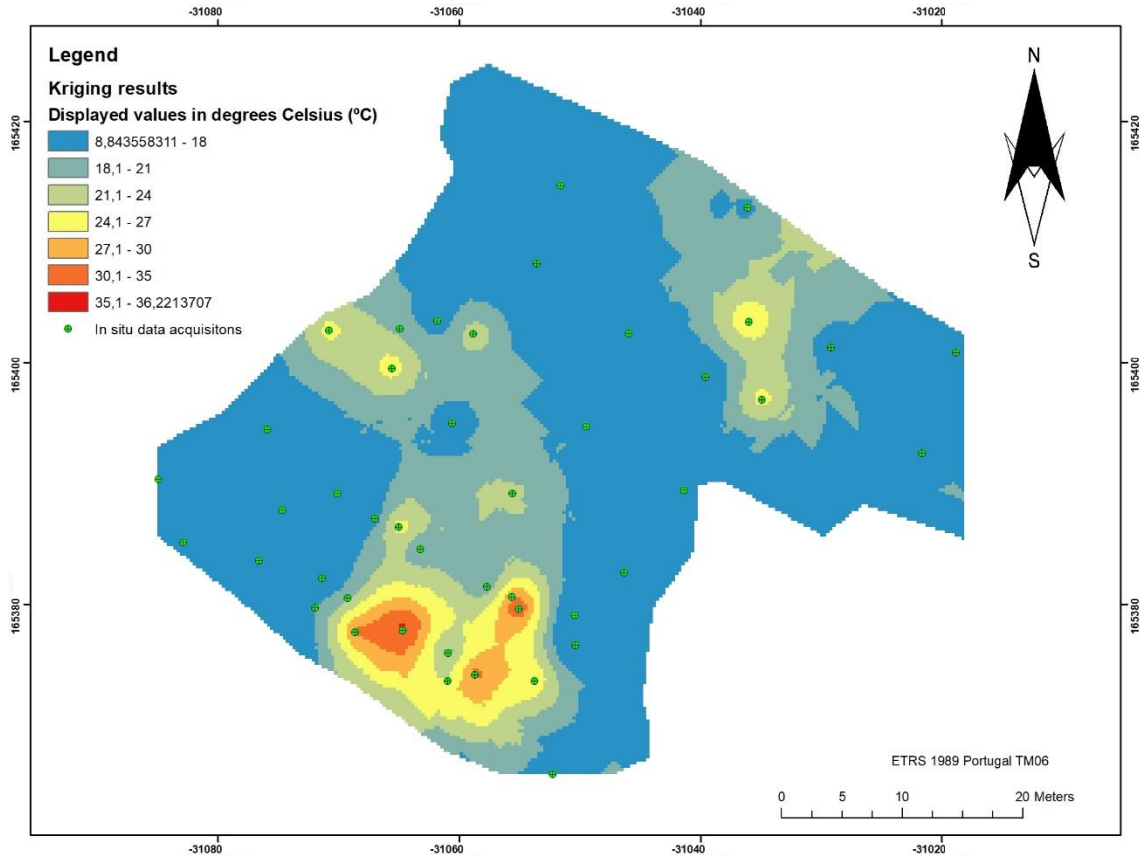


Fig. 20 - Ortomosaico térmico com os valores resultantes da krigagem comum.

A krigagem é um método de interpolação estocástico que permite determinar os erros associados a esta metodologia, estando estes apresentados na Tabela 5 para este caso.

Tabela 5 - Erros associados à krigagem.

Tipo de erro	Valor calculado (°C)
Erro médio	0.618
Raiz quadrada do erro médio quadrático	6.280
Raiz quadrada do erro médio normalizado	0.868
Erro padrão médio	7.220

Por forma a comparar os ortomosaicos térmicos e a krigagem, foram extraídos, destes diferentes tipos de dados térmicos, a temperatura máxima e mínima, assim como, a sua média e desvio padrão, apresentados na Tabela 6.

As diferenças verificadas estão maioritariamente relacionadas com a temperatura ambiente durante a recolha dos dados. Para o primeiro voo, a 23 de julho de 2019, a temperatura do ar variou entre 16°C e 20°C, para o segundo voo, a 30 de dezembro de 2019, a temperatura variou entre 6°C e 17°C, enquanto que, durante a recolha de dados *in situ*, a 4 de dezembro de 2019, a temperatura variou entre 5°C e 14°C.

Tabela 6 - Análise estatística dos ortomosaicos térmicos e temperaturas resultantes do método krigagem.

	Voo 1	Voo 2	<i>Kriging</i>
Temperatura Mínima (°C)	17.19	1.51	8.84
Temperatura Máxima (°C)	57.78	50.91	36.22
Temperatura Média (°C)	29.79	18.36	17.83
Desvio Padrão (°C)	3.91	6.59	3.58

A classificação não supervisionada *K-Means Cluster Analysis Operator* foi implementada como forma de avaliar a proporção de vegetação em comparação com a de solo, bem como, a sua localização na região de interesse. Inicialmente, foram criadas duas classes que resultaram numa proporção de 94.9% para solo nu e 5.1% de vegetação. A Fig. 21 representa a dispersão dessas duas classes.

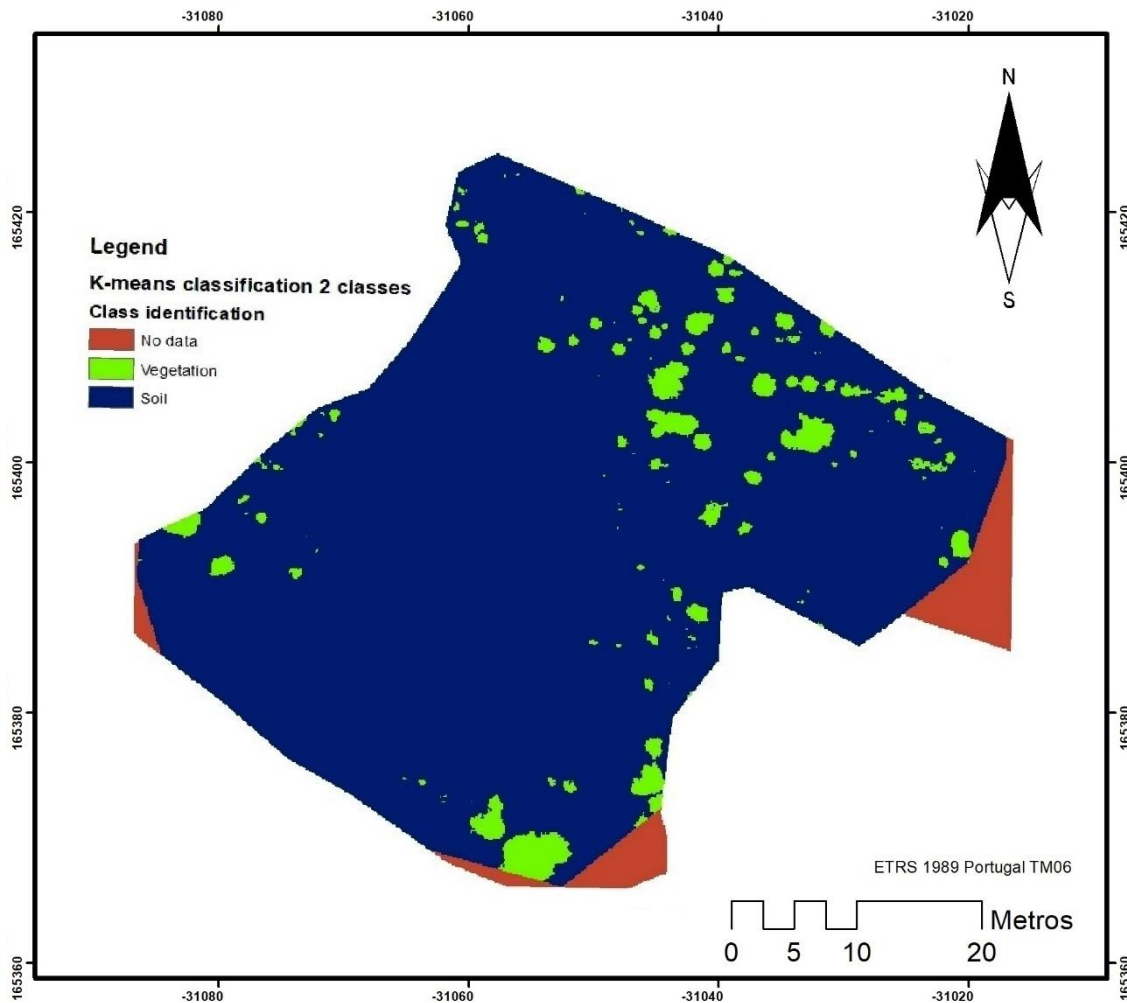


Fig. 21 - Resultado da classificação não supervisionada, *k-means clusters* separação em 2 classes.

Posteriormente, a mesma classificação não supervisionada foi implementada para a obtenção de três classes com o objetivo de determinar se existiria outra assinatura espectral que não tivesse sido detetada na classificação com duas classes. Foi observado que duas das classes seriam de vegetação e a remanescente seria solo nu, como é observável na Fig. 22. Neste caso a proporção é de 92.49% de solo, 2.4% de vegetação classe 1 e 5.11% de vegetação classe 2.

Com esta análise também foi possível determinar que a presença de vegetação apenas se verifica em regiões da zona de estudo onde a temperatura detetada à superfície é menor, justificando-se que é onde há maior probabilidade de desenvolvimento dos elementos vegetativos. Onde são detetados os pontos mais quentes, ou seja, zonas com temperaturas mais elevadas, não é possível o desenvolvimento de vegetação como consequência de um processo de autocombustão anterior e contínuo.

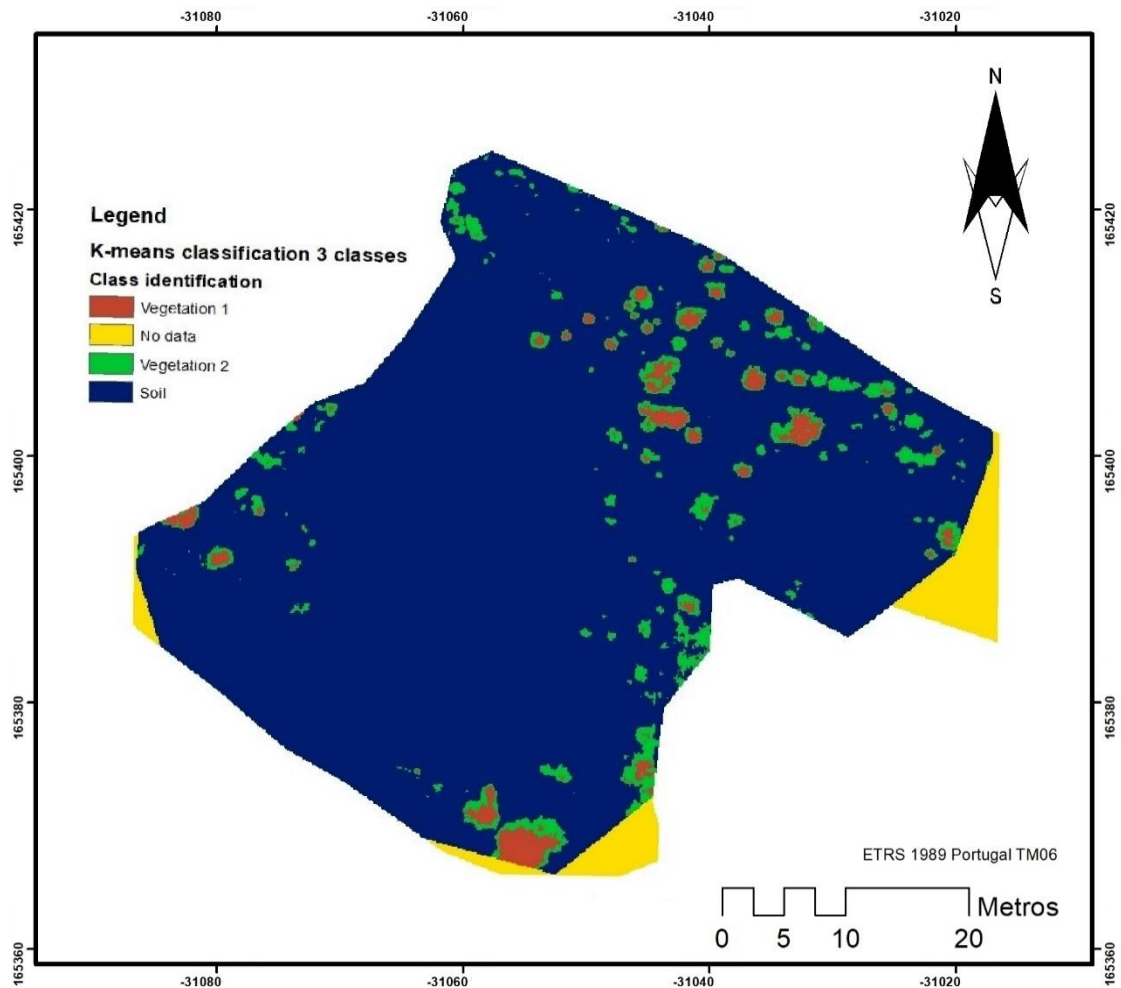


Fig. 22 - Resultado da classificação não supervisionada, *k-means clusters* separação em 3 classes.

Para determinar o estado fitossanitário da vegetação presente na escombreira, fez-se uso dos dados multiespectrais para calcular o índice de vegetação NDVI. A Fig. 23 apresenta o mapa resultante desse cálculo, em que é possível notar que a vegetação existente se encontra saudável e viável.

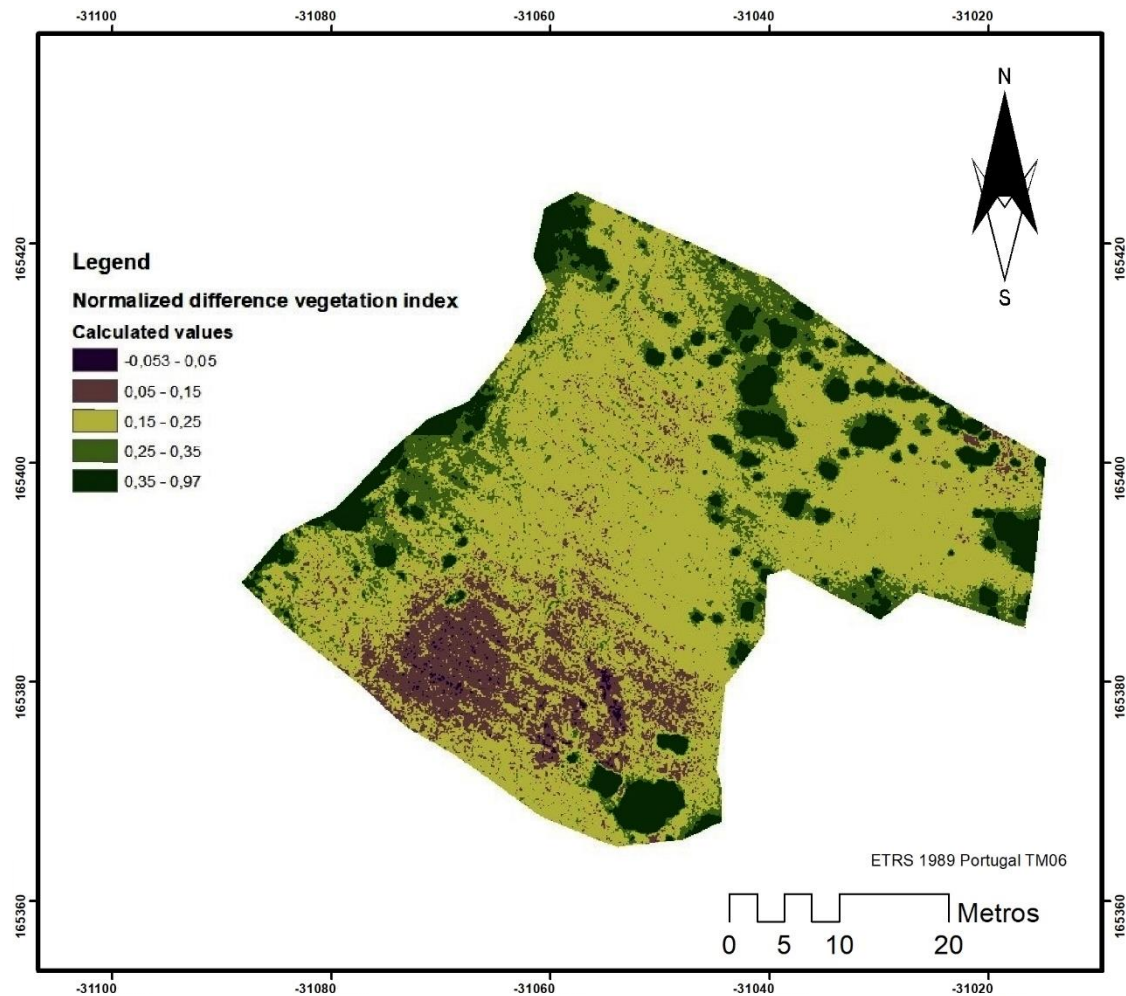


Fig. 23 - Resultados do cálculo do NDVI a partir dos dados multiespectrais.

Para além do NDVI, com o mesmo objetivo, procedeu-se ao cálculo do EVI, cujo mapa está ilustrado na Fig. 24. No caso deste índice de vegetação a interpretação não é tão clara porque o que é realçado como vegetação saudável, segundo os valores do cálculo EVI, corresponde na sua maioria ao solo nu, não se podendo retirar conclusões sobre o estado da vegetação devido ao incorreto ajuste da fórmula usada para o cálculo às bandas espectrais recolhidas pela câmara multiespectral e ao desconhecimento da assinatura espectral saudável específica para cada espécie vegetal existente.

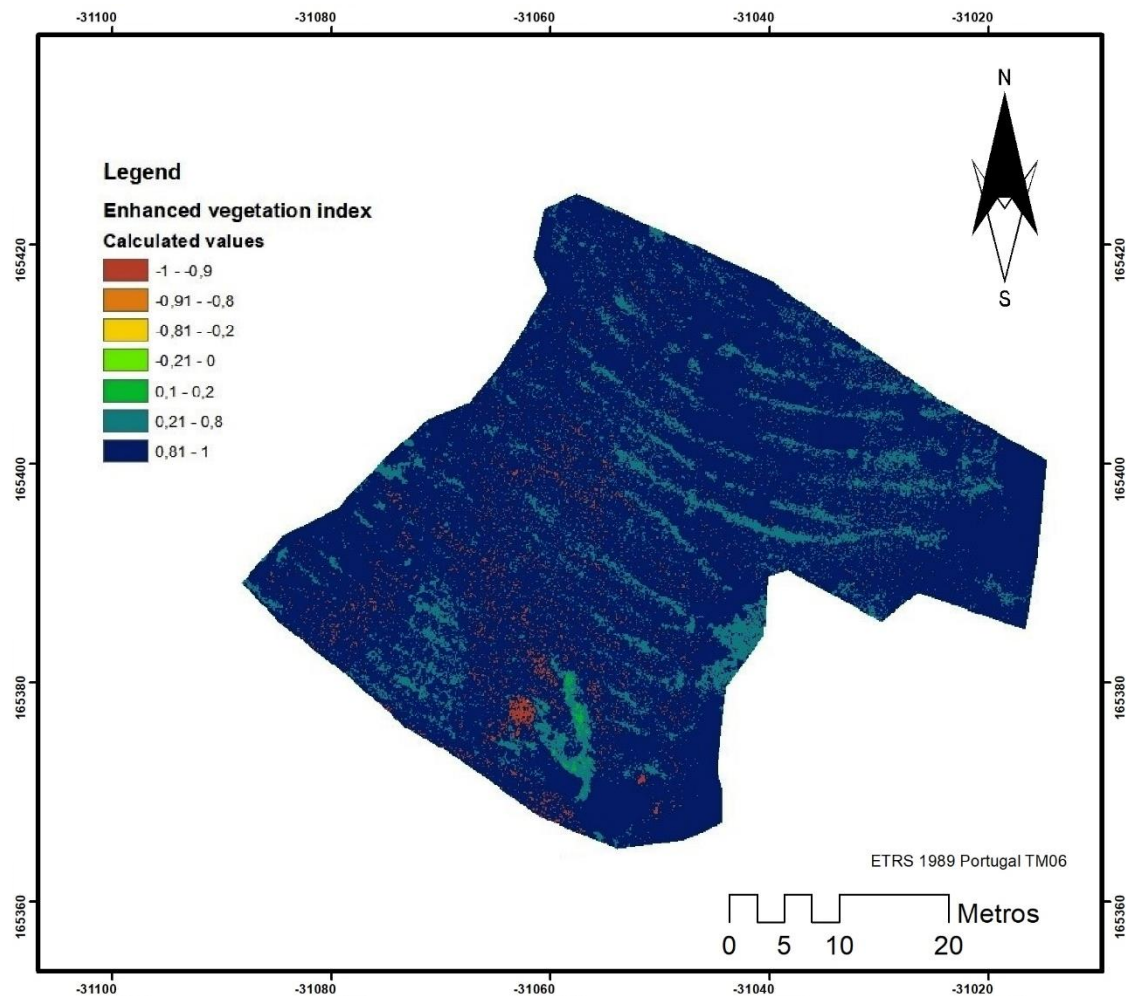


Fig. 24 - Resultados do cálculo do EVI a partir dos dados multiespectrais.

Por forma a validar os resultados altimétricos obtidos e permitir comparações entre os diferentes levantamentos foram definidos 167 pontos, considerados estáveis, exteriores à escombreira. As diferenças de elevação verificadas entre os MDS nestes pontos foram em média de 1 cm com um desvio padrão de 5 cm, o que comprova a inexistência de diferenças sistemáticas entre os MDS e que estes estão conferidos à precisão expectável [9].

Com vista à determinação da existência de subsidência, movimentações ou erosão do solo, foram definidos 217 pontos, na área de estudo, e comparadas as diferenças entre os valores do MDS, respetivos à recolha de dados de 23 de julho de 2019 e 7 de maio de 2020, em cada ponto.

Desta comparação resultou uma redução média da elevação de 30 cm, com a raiz quadrada do erro médio quadrático de aproximadamente 30 cm, verificando-se uma redução máxima da elevação de 73 cm. Apenas 5 dos pontos definidos apresentaram um aumento na elevação, sendo o máximo de 39 cm. A Fig. 25 representa todos os pontos definidos e a sua variação altimétrica.

A diferença verificada nos pontos com redução da elevação pode potencialmente ser explicada pelo estado de autocombustão da escombreira, uma vez que, a combustão dos materiais presentes no local leva a que estes percam volume e, conseqüentemente, ocorra subsidência. A deposição de material ao longo do declive pode explicar o aumento da elevação observado nos pontos onde ocorreram estes aumentos [9].

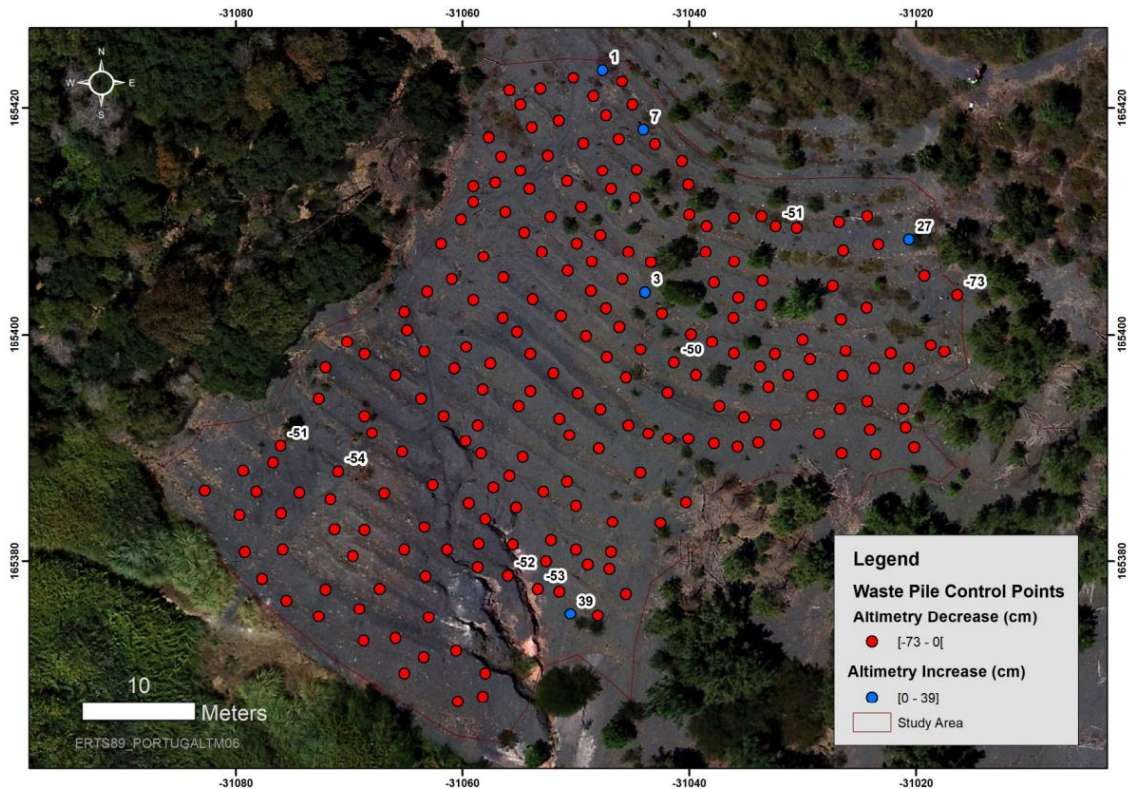


Fig. 25 - Alterações de altimetria estimadas a partir dos dois MDS sobre a área de estudo [9].

Adicionalmente, foram geradas curvas de nível com um espaçamento de 1 m para os dados recolhidos a 23 de julho de 2019 e 7 de maio de 2020. A Fig. 26 ilustra a comparação entre as curvas de nível mencionadas onde se observa uma recessão topográfica de 0.5 m, assim como, a suavização de características irregulares da superfície e a acentuação das escarpas existentes. Estas observações comprovam a existência de erosão do solo da escombreira [9].

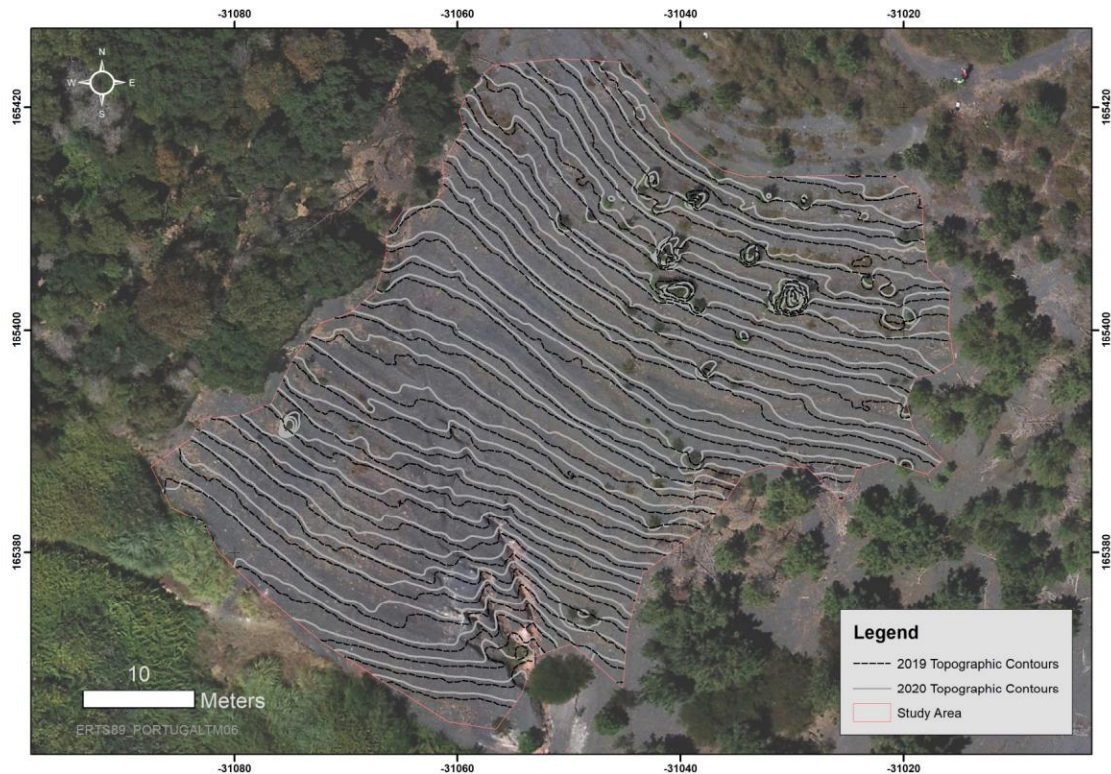


Fig. 26 - Linhas de contorno calculada a partir dos dois MDS sobre a área de estudo [9].

Finalmente, a Fig. 27 apresenta a interface gráfica da aplicação SIG. Esta aplicação foi desenvolvida como um *plugin* do software *QGIS 3.10* que se apresenta como um botão. Este botão, ao ser pressionado dentro do software, abre uma janela principal. A janela principal é constituída por 7 menus (*File*, *Water*, *Soil*, *Temperature Points*, *Temperature Maps*, *DEM (Digital Elevation Model)* e *LULC (Land Use Land Cover)*) e por outras ferramentas básicas como *Zoom in*, *Zoom out* e *Pan*, para além de um índice de conteúdos (*Layers*) e um ambiente de trabalho onde vai ser apresentada a informação gerada. No menu *File* é possível abrir ficheiros do tipo vetorial ou *raster*. Os menus *Water* e *Soil* fazem ligação à base de dados e permitem importar informação das análises das águas e dos solos, sendo capaz de selecionar diferentes dados com base na data de aquisição. O menu *Temperature Points* também recebe informação da base de dados e mostra as temperaturas medidas *in situ*, bem como a sua localização geográfica. Incorporado neste menu também se encontram os algoritmos geoestatísticos *Inverse Distance Weighting (IDW)* e krigagem que podem ser aplicados aos dados das campanhas *in situ* [57] [58]. Os menus *Temperature Maps* e *DEM* apresentam os ficheiros raster referentes aos ortomosaicos térmicos e aos MDS, respetivamente. O menu *DEM*, a partir do algoritmo *r.slope.aspect* da biblioteca *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)*, também permite criar mapas de orientação e declive com base nos MDS. Já no menu *LULC* é possível criar

mapas de uso e ocupação do solo com as funções *K-Means Cluster Analysis Operator 1.0*, do software *SNAP 7.0*, e *K-Means unsupervised classification*, da biblioteca *SAGA*. Todos os dados acessíveis através da aplicação são extraídos da ligação com a base de dados relacional [43] [57].

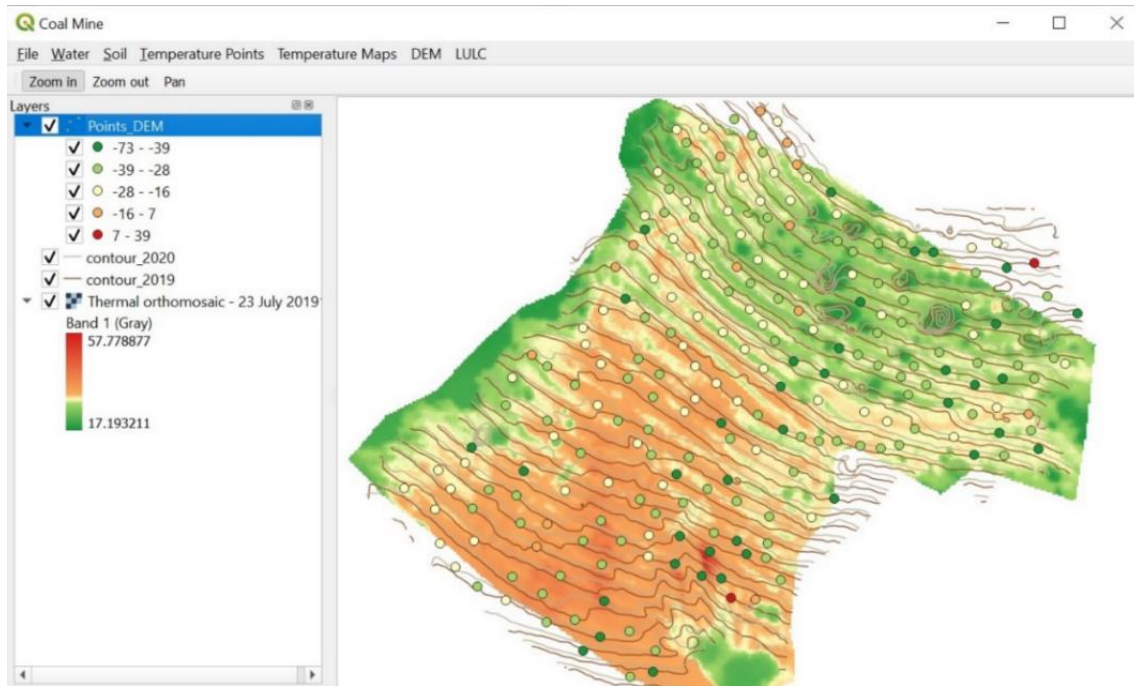


Fig. 27 - Vista da interface gráfica da aplicação SIG, onde se sobrepõe os dados do mosaico térmico com informação relacionada com o relevo e declive [19].

6. Conclusão

Reconhecendo as ameaças e fragilidades da pilha de resíduos, devido ao processo de autocombustão ainda ativo, o estudo e a monitorização da sua temperatura e dos movimentos do solo permitem avaliar, perceber e propor formas de mitigar os processos de contaminação e poluição que destabilizam os sistemas hídricos e geológicos envolventes.

Este estudo, integrado no projeto *CoalMine*, reconhecido como um processo de monitorização ambiental, tem como principal objetivo avaliar os movimentos do solo da escombreira e a variação das temperaturas da pilha de resíduos ao longo do tempo e as influências que estas possam ter na sua configuração.

Os processos de análise e recolha de informações e dados, devido à topografia característica da área de estudo, que tornava o acesso a certos pontos limitado, se não impossível, seguiram um protocolo metodológico que teve em conta essas dificuldades. Por exemplo, o método *in situ* foi estrangido em zonas de difícil acesso, com declives extremamente elevados o que não permitiu a medição de temperatura em toda a área de estudo. Comprovou-se que, com a metodologia de sensores e câmaras a bordo dos VANT, foi possível realizar a recolha de informação em toda a área de estudo e que a metodologia é viável em situações como esta, em que a área que se pretende estudar é de acesso difícil ou impossível.

Conclui-se que, o registo constante de elevadas temperaturas à superfície da pilha é intrínseco à mesma, por processos de autocombustão, contínuos, iniciados por incêndios florestais, e não pode ser unicamente fundamentado por esta sofrer outras influências externas que não os incêndios, como por exemplo, exposição solar direta. Esta conclusão apoia-se no facto de se captar elevadas temperaturas na superfície da escombreira em duas estações diferentes. A recolha de dados ocorreu no inverno, onde a exposição solar direta é menor, a temperatura ambiente é baixa e existe humidade, e no verão, com temperaturas do ar elevadas, elevada exposição solar, especialmente sendo esta voltada a sul, e um tempo seco com baixo teor de humidade. Apesar disto, verificam-se pequenas variações das temperaturas à superfície da escombreira com diferentes temperaturas exteriores e condições de exposição solar o que sugere uma influência da temperatura ambiente e da radiação solar, se bem que com um impacto muito reduzido. Assim, por forma a mitigar os efeitos da exposição solar e de elevadas temperaturas atmosféricas, que podem sonegar as variações térmicas resultantes da autocombustão, a monitorização da temperatura deve ser evitada em dias de elevadas temperaturas no meio ambiente e de elevada exposição solar.

Também se observou uma correlação entre os resultados obtidos da interpolação, krigagem, dos dados recolhidos *in situ* e os pontos de temperatura mais elevados que foram detetados através dos voos do VANT. Todavia, o elevado erro obtido associado ao método de interpolação pode refletir uma baixa relação espacial para a temperatura, neste caso de estudo.

Adicionalmente, é possível concluir que a área da escombreira está em processo de subsidência, e que este processo de mobilização de compostos e resíduos é agente ativo na diminuição do seu volume. Esta diminuição de matéria tem como causa fatores exteriores à pilha de resíduos e incontáveis como fatores climáticos, que por ação de águas da chuva, ventos fortes e até mesmo mudanças de temperaturas drásticas, provocam desequilíbrios no índice de humidade do solo impedindo o processo natural de absorção e filtragem de água, o que gera eventos de erosão do solo nas encostas declivosas. Para além disso o declive da encosta, associado à ausência de vegetação, proporciona o aumento da erosão.

As temperaturas da própria escombreira são igualmente um fator importantíssimo nestas mudanças volumétricas, que neste caso provocam variações na composição da matéria mineral, que sofre alterações por combustão ativa, reduzindo o seu volume.

Os dados recolhidos também permitiram concluir que zonas onde a temperatura registada permanecia acima dos 30°C não eram registados elementos vegetativos, e zonas onde a temperatura permanecia abaixo dos 30°C era possível registar a presença de vegetação dispersa.

No âmbito de projetos com dados, associados a informação geográfica, de múltiplas fontes e com elevadas dimensões informáticas, o ambiente de aplicações SIG, integrado com uma base de dados relacional, mostrou-se eficiente e apropriado como método de organização de informação, associada à aplicação e base de dados criadas, permitindo a visualização, manipulação e processamento de dados que facilita a interpretação e a criação de conteúdos gráficos facilitando assim a divulgação de resultados.

As conclusões apresentadas refletem os resultados referentes a uma parte do desenvolvimento do projeto *CoalMine* e não são representativas das ilações obtidas a partir da perspetiva final do projeto. Como uma monitorização multidisciplinar, este projeto envolveu diferentes áreas de investigação científica, tendo sido gerada uma vasta gama de literatura científica, em várias ciências como a Geologia ou Hidrologia, para além das publicações científicas associadas à Engenharia Geográfica.

Referências

- [1] Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, REQUIMTE - Laboratório Associado para a Química Verde, Tecnologias e Processos Limpos; Universidade de Évora, “CoalMine - Coal mining wastes: assessment, monitoring and reclamation of environmental impacts through remote sensing and geostatistical analysis,” 2018-2020. [Online]. Available: https://sigarra.up.pt/fcup/pt/PROJECTOS_GERAL.FICHA_PROJECTO?p_id=73192.
- [2] Ribeiro D. A., CEAU-FAUP, Centro de Estudos de Arquitectura e Urbanismo da Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, “LEGADO MINEIRO DA BACIA CARBONÍFERA DO DOURO, Permanências de um Sistema em transformação,” p. número 8, 2019.
- [3] Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, ICT – Instituto de Ciências da Terra, REQUIMTE – Rede Química e de Tecnologia Associação, “CoalMine,” 2020. [Online]. Available: <https://www.fc.up.pt/coalmine/trabalhos-a-desenvolver/>.
- [4] Lottermoser, Bernd G., “Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Third Edition,” Springer, 2010.
- [5] Bell F.G., Bullock S. E. T., Halbich T. F. J., Lindsay P., “Environmental Impacts associated with an abandoned mine in the Witbank Coalfield, South Africa,” *Int. J. Coal Geol.* vol. 45, pp. 195-216, 2001.
- [6] Finkelman, R., “Potential health impacts of burning coal beds and waste banks,” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 51, pp. 19-24, 2004.
- [7] INESC PORTO, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, “ECOAL - MGT- Gestão ecológica de pilhas de resíduos de carvão,” ECOAL, 2012-2015. [Online]. Available: https://sigarra.up.pt/fcup/en/projectos_geral.ficha_projecto?p_id=65309.
- [8] ICT – Instituto Ciências da Terra, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, “CoalMine, Estudos Prévios, ECOAL-MGT – Ecological Management of Coal Waste Piles in Combustion,” 2013-2015. [Online]. Available: <https://www.fc.up.pt/coalmine/estudos-previos/>.

- [9] Teodoro, A. C., Fernandes, J., Santos, P., Duarte, L., Gonçalves, J. A., Flores, D., "Monitoring of soil movement in a selfburning coal waste pile with UAV imagery," *Proceedings of SPIE*, 20 setembro 2020.
- [10] Duarte, L. , Teodoro, A.C., Fernandes, J., Santos, P., Flores, D., "Coal Mine: development of GIS open source application," *Coal Mine: development of GIS open source application*, 2020.
- [11] Teodoro, A.C., Fernandes, J., Santos, P. , Duarte, L. Flores, D., "Evaluation of temperature in a self-burning coal waste pile considering UAV data and in situ measurements,," *EVALUATION OF TEMPERATURE IN A SELF-BURNING COAL WASTE PILE*, 2020.
- [12] Artur F.T.Vieira de Sousa, *Breve História da Exploração Mineira em Gondomar*, 2017.
- [13] "O Museu Mineiro de São Pedro da Cova preserva 170 anos da história da freguesia," *Mundo Português*, [Online]. Available: <https://www.mundoportugues.pt/2020/01/03/o-museu-mineiro-de-sao-pedro-da-cova-preserva-170-anos-da-historia-da-freguesia>.
- [14] "SIPA, Sistema de Informação para o Património Arquitétonico," PATRIMÓNIO CULTURAL - Direção Geral do Património Cultural, [Online]. Available: http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=4871.
- [15] "Fânzeres São Pedro da Cova," Junta das Freguesias, [Online]. Available: <https://www.fanzeres-saopedrodacova.pt/index.php/conhecer/historia/503-freguesia-de-sao-pedro-da-cova>.
- [16] "Fânzeres São Pedro da Cova," Junta das Freguesias, [Online]. Available: <https://www.fanzeres-saopedrodacova.pt/index.php/mm/edificio>.
- [17] "Estátua ao Mineiro," Fânzeres São Pedro da Cova Junta das Freguesias, [Online]. Available: <https://www.fanzeres-saopedrodacova.pt/index.php/conhecer/patrimonio/458-estatua-ao-mineiro>.
- [18] Carmen Ferreira, "As minas de S.Pedro da Cova (Gondomar)," FLUP/CEGOT, Maio 2010. [Online]. Available: fonte: https://www.riscos.pt/wp-content/uploads/2018/Encontros/IICIRVIENR/Aprst/IICIR_VIENR_ppt51.pdf.

- [19] Teodoro A. C., Santos P., Marques J. E., Ribeiro J., Mansilha C., Melo A., Duarte L., Rodrigues de Almeida C., Flores D., “An Integrated Multi-Approach to Environmental Monitoring of a Self-Burning Coal Waste Pile: The São Pedro da Cova Mine (Porto, Portugal) Study Case,” *Environments* 2021, 2021.
- [20] Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F., “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” *Meteorologische Zeitschrift Vol. 15 No. 3*, p. 259–263, 2006.
- [21] Couto, H., “As mineralizações de Sb-Au da região Dúrico-Beirã,” *Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Tese de Doutoramento*, 1993.
- [22] Wagner, R.; De Sousa, M. L., “The Carboniferous megaflores of Portugal: A revision of identifications and discussion of stratigraphic ages,” *Serviços Geológicos de Portugal*, 1983.
- [23] Rocha J, Santos P., Ribeiro J., Marques J. E., Mansilha C., Flores D., “Caracterização hidrogeoquímica de efluentes da mina de carvão de São Pedro da Cova,” em *Comunicações Geológicas, Volume 107, Especial II, ISSN: 0873-948X*, Gondomar, LNEG - Laboratório nacional de Energia e Geologia, I.P., 2020, pp. 129-132.
- [24] LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., “Carta de Depósitos Minerais de Portugal (Região Norte),” 2019. [Online]. Available: fonte:<https://www.lneg.pt/project/carta-de-depositos-minerais-de-portugal/>.
- [25] Hawley, M, Cunning, J., “Guidelines for mine waste dump and stockpile design,,” CSIRO Publishing, 9781486303519 (ePDF).
- [26] Liao, X.; Li, W.; Hou, J., “Application of GIS Based Ecological Vulnerability Evaluation in Environmental Impact Assessment of Master Plan of Coal Mining Area,,” *Procedia Environ. Sci.*, 18, p. 271–276, 2013.
- [27] Bayliss, P.; Van Dam, R.; Bartolo, E., “Quantitative Ecological Risk Assessment of the Magela Creek Floodplain in Kakadu National Park, Australia: Comparing Point Source Risks from the Ranger Uranium Mine to Diffuse Landscape-Scale Risks,,” *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.*, 18, p. 115–151, 2012.
- [28] Wu, Y.; Xu, Y.; Zhang, J.; Hu, S.; Liu, K., “ Heavy metals pollution and the identification of their sources in soil over Xiaoqinling gold-mining region, Shaanxi, China,,” *Environ. Earth Sci.*, 64, p. 1585–1592, 2011.

- [29] Radenović, A.; Medunić, G.; Saikia, B.K., "Comparative review of Croatian and Indian air pollution studies with emphasis on pollutants derived by coal combustion.," *Rud. Geol. Naft. Zb.*, 32, p. 33–43, 2017.
- [30] Rubtsov N.M., Boris S. S. Seplyarskii B. S., Alymov M.I, "Ignition and Wave Processes in Combustion of Solids," em *Heat and Mass Transfer, ISSN 1860-4846, ISSN 1860-4854, ISBN 978-3-319-56507-1, ISBN 978-3-319-56508-8*, M. F. Mewes D., Ed., Springer International Publishing AG, 2017.
- [31] C. L. Miller, Assistant Professor of Surveying Director, "The Spatial Model Concept of Photogrammetry," em *The Spatial Model Concept of Photogrammetry*, Photogrammetry Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- [32] Zhilin L., Jun C., Emmanuel B., "Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences , ISBN: 978-0-415-47805-2, ISBN: 978-0-203-88844-5," em *2008 ISPRS CONGRESS BOOK*, CRC Press/Balkema, 2008.
- [33] Christianson S., Hofstetter H.W., ""Some Historical Notes on Carl Pulfrich"," *American Journal of Optometry and Archives of the American Academy of Optometry*, vol. 49, pages 944 - 947, 1972.
- [34] Wolf P. R., Dewitt B. A., Wilkinson B. E., "Elements of Photogrammetry with Applications in GIS," em *Elements of Photogrammetry with applications in GIS*, McGraw-Hill Education, 2014.
- [35] Professor Dr Thomas Luhmann, Dr Stuart Robson, Dr Stephen Kyle, Professor Ian Harley, "Principles, techniques and applications," em *Close Range Photogrammetry* , ISBN for CD 978-184995-057-2, Whittles Publishing, 2011.
- [36] Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote, "Manual of Photogrammetry," American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004 , Fifth Edition.
- [37] Schenk, T., "Introduction to Photogrammetry," em *Introduction to Photogrammetry*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, 2005.
- [38] Tommaselli, Antonio M. G., "Fotogrametria Básica - Introdução," em *Fotogrametria Básica - Introdução*, 2009.

- [39] Oliver M. A., Webster R., “Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging,” em *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*, SpringerBriefs in Agriculture, 2015.
- [40] Cressie N., “The Origins of Kriging,” *Mathematical Geology*, Vol. 22, No. 3, 1990.
- [41] Oliver M.A, Webster R., “A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging,” *CATENA*, Volume 113, pp. 56-69, February 2014.
- [42] Gonçalves M.L., Netto M. L. A., Jurandir Zullo Jr., Ferreira Costa J. A., “Classificação não-supervisionada de imagens de sensores remotos utilizando redes neurais auto-organizáveis e métodos de agrupamentos hierárquicos.,” em *Revista Brasileira de Cartografia No 60/61 Abril 2008*, 2008.
- [43] ESA, “SNAP - Sentinel Application Platform Software Help Manual”.
- [44] Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L.G., “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices,” *Remote Sensing of Environment*, Volume 83, Issues 1–2, pp. 195-213, November 2002.
- [45] Rouse, J. W., Hass, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W, “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite),” em *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, Greenbelt , SP-351, 1973, pp. 309-317.
- [46] Genesis T. Yengoh, David Dent Lennart Olsson, Anna E. Tengberg Compton J. Tucker III, “Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) To Access Land Degradation at Multiple Scales; Current Status, Future Trends, and Practical Considerations,” em *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) To Access Land Degradation at Multiple Scales; Current Status, Future Trends, and Practical Considerations*, SpringerBriefs in Environmental Science, 2015.
- [47] Xiang G., Alfredo R. H., Wenge N., Tomoaki M., “Optical-Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination,” *Remote Sensing of Environment*, 2000.
- [48] Huete, “Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS, huete 1994,” 1994.

- [49] Analyses, SAGA. System for Automated Geoscientific, 2020. [Online]. Available: <http://www.saga-gis.org/>.
- [50] PostGIS, "Spatial and Geographic objects for PostgreSQL," 2020. [Online]. Available: <http://postgis.net/>.
- [51] "QGIS, QGIS Project," 2022. [Online]. Available: <http://www.qgis.org/>.
- [52] "Phantom 4 Pro," DJI, [Online]. Available: <https://www.dji.com/pt/phantom-4-pro>.
- [53] "Getting Started With RedEdge-3 (Legacy)," Micasense , [Online]. Available: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/235402807-Getting-Started-With-RedEdge-3-Legacy->.
- [54] "FLIR Vue Pro R," TELEDYNE FLIR , [Online]. Available: <https://www.flir.com/products/vue-pro-r/>.
- [55] Complete Safety Supplies, "ETI Raytemp 4 Infrared Thermometer," [Online]. Available: <https://www.completesafetysupplies.co.uk/temperature-monitoring-c18/infrared-thermometers-c15/eti-raytemp-4-infrared-thermometer-with-lcd-display-p64>.
- [56] "Trimble RTK GNSS R6," Agrimétrica, [Online]. Available: <https://agrimetricatopografia.com.br/trimble-rtk-gnss-r6/>.
- [57] "SAGA System for Automated Geoscientific Analyses," 2022. [Online]. Available: <http://www.saga-gis.org/>.
- [58] "GRASS, The world's leading Free GIS software.," 2022. [Online]. Available: <http://grass.osgeo.org/>.