

Instrumento de gestão de áreas contaminadas por metais combinando dados de Química, Geofísica, Deteção Remota, Inteligência Artificial e Gestão – Projeto INCOME

Instrument for managing areas contaminated by metals combining data from Chemistry, Geophysics, Remote Sensing, Artificial Intelligence and Management – INCOME Project

OLIVEIRA, Rui J. ^(1*); CALDEIRA, Bento ⁽¹⁾; PALMA, Patrícia ⁽²⁾; COSTA, Maria J. ⁽¹⁾; FIALHO, Ana ⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade de Évora, Departamento de Física, CREATE - Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia, Earth Remote Sensing Laboratory, Évora, Portugal.

⁽²⁾ Instituto Politécnico de Beja, Departamento Tecnologias e Ciências Aplicadas, Beja; CREATE - Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia, Évora; GeoBioTec, NOVA School of Science and Technology, Caparica, Portugal.

⁽³⁾ Universidade de Évora, Departamento de Gestão, Évora; Centro de Investigação em Contabilidade e Fiscalidade, IPCA, Barcelos, Portugal.

* Autor correspondente: ruio@uevora.pt

RESUMO

O Projeto INCOME tem como objetivo propor a criação de um modelo de gestão ambiental para áreas mineiras contaminadas por metais potencialmente tóxicos. Este modelo integra os resultados da aplicação de um conjunto de métodos analíticos e instrumentos de monitorização de áreas contaminadas, como análises da vegetação, química de solos e águas, geofísica e deteção remota por satélite. Estes dados serão utilizados como inputs em algoritmos de inteligência artificial, o que permitirá a produção de modelos de monitorização da contaminação utilizando menos dados do que as metodologias-padrão. Propõe-se a criação de um modelo de gestão sustentável, baseado na combinação de ferramentas a desenvolver, que permitirá a otimização e poupança de recursos nas fases de amostragem e análise, fornecendo informação importante em tempo real para a tomada de decisão com vista à gestão integrada das áreas contaminadas. O instrumento terá ampla aplicabilidade na deteção de contaminação por metais, abrindo a possibilidade à transferência de tecnologia para diferentes áreas geográficas e para outros cenários de contaminação por metais, como aterros sanitários, indústria e explorações agrícolas. O retorno ambiental, social e económico para as áreas contaminadas deriva da incorporação de novas estratégias às rotinas atuais; redução e otimização de procedimentos e tempos de execução; economia de recursos; recuperação mais eficaz do local contaminado; equilíbrio dos ecossistemas; retorno para empresas; redução da pegada ambiental; e promoção da sustentabilidade social, ambiental e económica da região.

PALAVRAS-CHAVE

Química Ambiental, Geofísica Aplicada, Deteção Remota, Inteligência Artificial, Locais mineiros abandonados, Solos contaminados por metais.

INTRODUÇÃO

A extração mineira é uma realidade em todo o planeta (Figura 1) sendo indispensável para o desenvolvimento económico de diversos países [1]. Dos elementos mais explorados, destacam-se os metais para a construção de equipamentos elétricos e eletrónicos, combustíveis para o uso em veículos, e para uso no fabrico de cosméticos e produtos farmacêuticos, e na construção de edifícios e vias de comunicação. Os dados das quantidades de metais extraídos no mundo refletem a importância da atividade. Em 2021 (WMD2023), a extração mundial foi de 17.9 biliões de toneladas, e em Portugal atingiu os 1.15 milhões de toneladas.

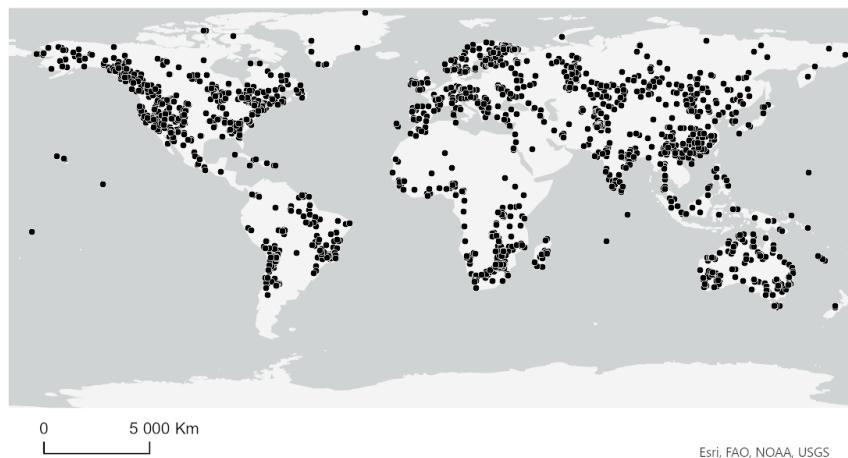


Figura 1: Ocorrências mineiras mundiais [2].

Em Portugal existem três minas atualmente em laboração, a Mina da Panasqueira (Volfrâmio), Neves Corvo e Aljustrel (Cobre).

A indústria extrativa possui um impacto ambiental negativo que deve ser mitigado após o encerramento das minas. A exploração mineira em Portugal nem sempre contemplou a minimização de impactos ambientais [3]. Apenas empresas em laboração contemplam a proteção ambiental associada à da exploração no quadro legislativo [4]. Existem vários locais mineiros abandonados em território português que possuem sérios problemas de contaminação de solos e águas por falta de recuperação ambiental após o encerramento destas minas. Exemplos mais graves de minas abandonadas nestas condições são as Mina da Urgeiriça (Urânio) e Mina de São Domingos (Surfuretos).

MINA DE SÃO DOMINGOS

A Mina de São Domingos, localizada no Alentejo no concelho de Mértola (integrada na Faixa Piritosa Ibérica), laborou entre 1855 e 1966. O minério extraído possuía as seguintes percentagens de elementos metálicos principais: 45-48% de enxofre, 1,25% de cobre, 2-3% de zinco (Figura 2) [5].



Figura 2: Localização da Mina de São Domingos e seu enquadramento regional no que respeita às principais linhas de água, como o Rio Chança e Rio Guadiana.

O complexo mineiro estende-se ao longo de quase 20 km desde a aldeia da Mina de São Domingos até à localidade de Pomarão, em que o minério era transportado em linha férrea para ser posteriormente expedido em barcos ao longo do Guadiana. Ao longo do trajeto em terra, foram depositadas escombreiras resultantes da extração que possuem altos níveis de contaminantes por metais potencialmente tóxicos (MPT), destacando-se o cobre, chumbo, zinco, arsénico e antimónio.

Uma área mineira abandonada acarreta problemas de contaminação ambiental graves nos solos e águas, com desregulação dos ecossistemas envolvidos e que se pode traduzir a médio-longo prazo num problema de saúde pública. Um dos maiores problemas associados a explorações mineiras de pirites, como a Mina de São Domingos, é a produção de efluentes mineiros de drenagem ácida, com elevadas concentrações de metais, os quais têm origem na oxidação de sulfuretos existentes nestes resíduos acumulados à superfície [6].

No *ranking* de perigosidade ambiental, realizado pelo extinto Instituto Geológico e Mineiro, as minas da Faixa Piritosa Ibérica são classificadas de risco elevado devido ao grande volume de escombreiras, as quais contêm teores acentuados em MPT.

As Minas de S. Domingos, Aljustrel e Caveira destacam-se ainda pela presença de áreas significativas cobertas por escombros de rocha encaixante da mineralização, minério, escórias e materiais lixiviados [7].

A área de S. Domingos possui características próprias capazes de promover um problema ainda maior: a mina, instalações de apoio e escombreiras encontram-se localizadas ao longo de uma linha de água que drena para o rio Chança, que, por sua vez, possui uma barragem, junto à sua foz com o rio Guadiana, junto à localidade de Pomarão (ambos rios internacionais). A barragem do rio Chança armazena água para consumo humano em Espanha e o rio Guadiana fornece água para utilização agropecuária.

A exposição humana a MPT, quer por consumo de água contaminada, quer por ingestão de alimentos contaminados, pode promover, a médio-longo prazo, a redução da saúde geral da população, levando ao aumento das taxas de morbilidade com altos custos médicos [8]. O risco para a saúde humana devido à contaminação dos recursos abióticos por metais tornou-se uma importante questão económica e social nas sociedades atuais [9]. Os contaminantes do solo podem ser responsáveis por efeitos na saúde que custam milhões de euros, mas os estudos económicos para quantificar o verdadeiro custo estão ainda em fase embrionária. Problemas de saúde, desde cancro (arsênico, amianto, dioxinas), danos neurológicos (chumbo, arsênico), doenças renais (chumbo, mercúrio, cádmio) a doenças ósseas (chumbo, flúor, cádmio) são reportados mundialmente por exposição a MPT [10]. De facto, estudos epidemiológicos em todo o mundo, relatam a correlação entre doenças humanas e solos contaminados por metais, destacando a necessidade de estratégias de remediação para diminuir o custo de solos contaminados que podem influenciar a cadeia alimentar.

O complexo da Mina de São Domingos não possui qualquer edificação urbana, a não ser a localidade junto à corta, onde viviam os mineiros e ainda vivem as suas famílias.

Entre 2015 e 2022, a Empresa de Desenvolvimento Mineiro, S.A. realizou ações de recuperação ambiental no local, tendo sido realizadas obras de recuperação do sistema de canais de recolha de águas de escorrência superficial em duas fases, que terminaram em 2020 e 2022, tendo sido investidos 7.218.051,35 €.

ESTUDO DE UM LOCAL CONTAMINADO POR METAIS – PROJETO INCOME

O estudo e controlo de um local mineiro contaminado por metais como a Mina de São Domingos, que possui uma área de cerca de 2000 ha, implica que se faça amostragem de solos e águas, em vários pontos ao longo do tempo. A quantificação dos MPT é obtida por análise química laboratorial. Para um local mineiro abandonado não existem regras estabelecidas para a escolha do espaçamento entre amostras, mas se considerarmos a legislação que existe para amostragem de solos agrícolas, em que é necessário fazer amostragem a cada 5 ha, no caso da mina, haveria necessidade de se obter amostras em 400 localizações, o que acarreta custos operacionais muito elevados apenas para se estudar o local num único momento, a somar aos elevados custos das ações de recuperação ambiental. O controlo e remediação são processos bastante demorados e nem sempre existe financiamento disponível para o efeito de uma forma contínua e eficaz de modo a resolver o problema ambiental do local.

A contaminação por MPT da Mina de São Domingos tem sido alvo de investigação científica de diversas equipas. Entre 2004 e 2022 foram publicados vários artigos científicos onde se encontram os principais resultados e conclusões. A análise das informações disponíveis nessas fontes bibliográficas permite verificar que os estudos realizados em São Domingos não são capazes de cobrir toda a área do complexo mineiro (Figura 3).



Figura 3: Localização de vários pontos de amostragem de solos em que foram efetuadas análises de quantificação de MPT entre 2004 e 2022, e fotografias de vários setores da Mina de São Domingos (fonte: projeto INCOME). Os retângulos a vermelho representam as quatro áreas a estudar durante o projeto.

Desde 2023, encontra-se em execução o Projeto INCOME – Inputs para uma região mais sustentável – Instrumentos para a gestão de zonas contaminadas por metais (Fundação la Caixa). A investigação é desenvolvida por um consórcio criado para o efeito, constituído por Instituições de Ensino Superior (Universidade de Évora, Instituto Politécnico de Beja e Universidade de Granada), Unidades I&D (CREATE, MARE, ICT, CICF, VISTA LAB e CIMA), uma autarquia (Câmara Municipal de Mértola), uma agência governamental que atua na área do ambiente (Agência Portuguesa do Ambiente), duas empresas privadas (La Sabina, S.A., e Empresa de Desenvolvimento Mineiro, S.A.) e uma fundação (Fundação Serrão Martins), que conjuga a investigação realizada com o conhecimento e a informação dos *stakeholders* do projeto (Figura 4).



Figura 4: Parceiros do Projeto INCOME.

Este projeto propõe a criação de um modelo de gestão ambiental para áreas mineiras contaminadas por metais potencialmente tóxicos. O modelo integrará os resultados da aplicação de um conjunto de métodos e instrumentos de análise para a monitorização das áreas contaminadas, tais como, análise da vegetação; química de solos e águas, geofísica, deteção remota hiperespectral e inteligência artificial. Os *inputs* para a sustentabilidade das regiões contaminadas serão alcançados através da otimização e poupança de recursos (humanos e financeiros) nas etapas de amostragem e análise laboratorial, controle e gestão da contaminação por metais em tempo real.

A análise da vegetação na Mina de São Domingos permite identificar as espécies vegetais capazes de existir em condições de contaminação por MPT. Algumas delas são capazes de incorporar MPT, podendo desempenhar um papel importante na remediação ambiental do local. Estudos anteriores identificaram várias espécies vegetais no local [11], destacando-se as seguintes (mais abundantes): *Erica arborea*, *Anarrhinum bellidifolium*, *Lavandula stoechas*, e *Cistus ladanifer* (Figura 5).

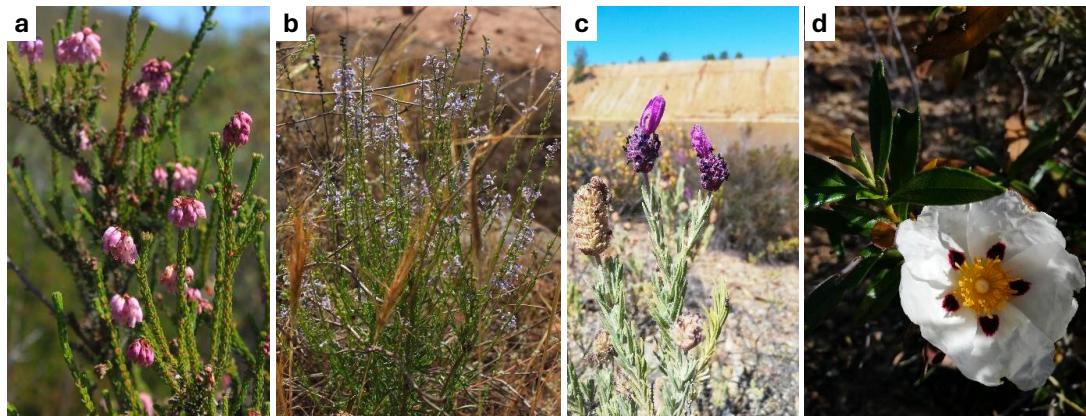


Figura 5: Espécies vegetais mais abundantes na Mina de São Domingos [11]: (a) *Erica andevalensis*, (b) *Anarrhinum bellidifolium*, (c) *Lavandula stoechas*, e (d) *Cistus ladaniferii*.

A análise química de solos e águas permite fazer quantificação de metais. Ao longo da linha de água onde se localizam as escombreiras são conhecidos os setores mais contaminados. Na Tabela 1 encontram-se representadas as concentrações de MPT no solo de três setores da mina, obtidos por Alvarenga et al. (2012). Os níveis de contaminação são diferentes nos três setores considerados: o arsénico, cádmio e níquel existem em maior quantidade no setor A, o chumbo, cobre, zinco no setor B, e o crómio no setor C.

Tabela 1: Concentrações de elementos-traço de frações do solo de três setores da Mina de São Domingos (Alvarenga et al., 2012).

Local	Quantificação de metais (mg.kg ⁻¹)						
	As	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
A	7955,00	202,00	84,00	26,98	3,38	17,00	14,20
B	674,00	434,00	168,00	3920,00	1,87	8,80	10,00
C	961,00	224,00	137,00	1624,00	2,60	24,70	12,00

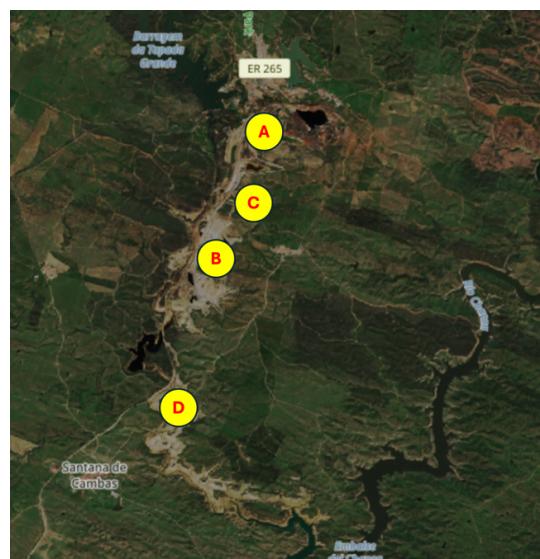


Figura 5: Localização dos pontos de amostragem considerados e dos levantamentos geofísicos experimentais realizados.

A geofísica aplicada permite caracterizar o interior das escombreiras mineiras, nomeadamente para estimar o volume de materiais acumulados e caracterizar os solos contaminados. Antes de se aplicarem os diversos métodos disponíveis há necessidade de

realizar levantamentos experimentais, para avaliar a sua aplicabilidade no que respeita à obtenção de dados com informação útil. Na Figura 6 encontram-se representados valores de condutividade elétrica obtidos em dois setores da mina com o método de indução eletromagnética. Os valores mais elevados (cor azul) estão localizados nos locais mais contaminados. No setor D, existe uma barragem de retenção de sedimentos. Os valores mais elevados encontram-se a montante da barragem; a jusante os valores são menores, significando que a barragem está a desempenhar com eficácia o seu propósito. Este método funciona num local contaminado por metais, tendo sido selecionado para ser aplicado nas várias áreas de estudo. Por outro lado, o método magnético, também testado nos mesmos setores, não mostrou ser eficaz, uma vez que a sua representação no espaço não apresenta contrastes, e por isso não foi selecionado para ser aplicado nas áreas de estudo do projeto.

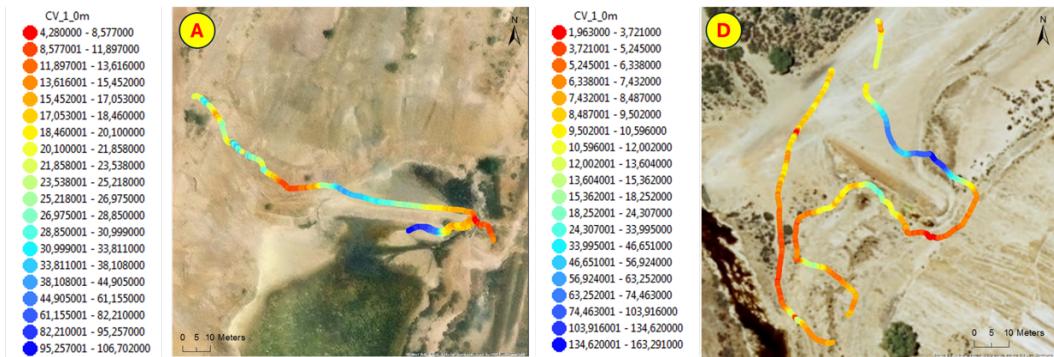


Figura 6: Resultados do método de indução eletromagnética obtidos em alguns setores da Mina de São Domingos durante um levantamento preliminar para avaliar a capacidade do método produzir resultados úteis para a identificação de MPT em solos.

A deteção remota por satélite permite efetuar a caracterização ótica dos materiais que existem à superfície, nomeadamente com dados hiperespectrais, sendo objetivo o estabelecimento de correspondências entre os materiais identificados com dados satélite e os MPT. Considerando os dados multiespectrais de Sentinel-2 do Programa Copernicus obtidos sobre a mina (Figura 7), a caracterização ótica de diversos modos de visualização (cor verdadeira, cor falsa, índices NDVI e NDMI e imagem classificada), permite determinar que locais correspondem a escombreiras mineiras e que consequente estarão mais contaminados.

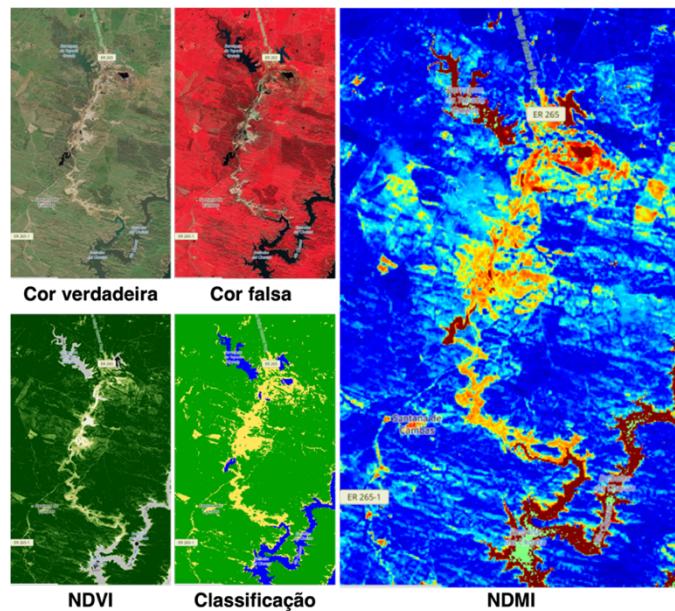


Figura 7: Representação de vários produtos obtidos pelo satélite Sentinel-2 (Programa Copernicus) sobre a Mina de São Domingos. Podem-se considerar imagens com cor verdadeira ou com cor falsa, classificação em diferentes materiais e podem ser calculados índices como NDVI e NDMI, que permitem distinguir, por exemplo, entre terreno com e sem vegetação.

A inteligência artificial terá um papel fundamental no desenvolvimento do modelo de contaminação dos solos, na medida em que a partir dos inputs dos diferentes métodos de análise serão identificados mapas de contaminação dos solos da Mina. Para

isso, serão usados algoritmos de *machine learning* para treinar os dados. O objetivo é que se torne possível usar como input principal dados hiperespectrais de satélite para obter mapas de contaminação, o que tornará o processo de identificação dos locais mais contaminados (maior risco) mais rápido e, consequentemente com custos operacionais mais baixos, por comparação com as metodologias atualmente aplicadas.

O modelo em desenvolvimento, será replicável a outras regiões e outros ambientes, o que se traduz num valor acrescentado que poderá permitir gerar retorno económico aliado a atividades de investigação científica. A transferência do conhecimento para a sociedade e tecido empresarial é um dos objetivos do projeto e será realizada com recurso a técnicas de gestão, nomeadamente através de um plano de comercialização do modelo baseado em estudos de mercado e de viabilidade económica e financeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O instrumento de gestão de contaminações por metais em solos mineiros abandonados constitui uma ferramenta útil para conhecer o estado de contaminação de um local com tempo de análise mais reduzido que os métodos convencionais, usando técnicas de deteção remota por satélite aliado a metodologias de inteligência artificial.

A investigação que se encontra a ser desenvolvida no âmbito do projeto INCOME contribuirá para um aumento da qualidade de vida das populações envolvidas, assim como das condições ambientais, podendo fomentar oportunidades de criação de riqueza na região, nomeadamente através da promoção do turismo mineiro (que já se observa na Mina de São Domingos), turismo científico, e da reutilização de resíduos, promovendo-se a economia circular. Também contribui para a concretização de alguns indicadores da Agenda 2030 da ONU nomeadamente para algumas metas do ODS 15 – Proteger a Vida Terrestre.

AGRADECIMENTO

Este trabalho é apoiado pelo Programa Promove da Fundação "la Caixa", em parceria com o BPI e a Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito do projeto INCOME – Inputs para uma região mais sustentável: Instrumentos para a gestão de zonas contaminadas por metais, PD23-00013, e por fundos nacionais pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., no âmbito da UID/06107/2023 – Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia.

REFERÊNCIAS

- [1] Walser, G. (2002). Economic impact of world mining. IAEA.
- [2] Labay, K., Burger, M.H., Bellora, J.D., Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, Bradley, D.C., Mauk, J.L., and San Juan, C.A., 2017, Global Distribution of Selected Mines, Deposits, and Districts of Critical Minerals: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/F7GH9GQR>.
- [3] Santos Oliveira, J. M. (1997). Algumas reflexões com enfoque na problemática dos riscos ambientais associados à actividade mineira. Estudos, Notas e Trabalho – Instituto Geológico e Mineiro (IGM) 39, 3-25.
- [4] Lei de Bases do Ambiente (Lei nº 11/87, 1987).
- [5] Sítio eletrónico da Empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA: Recuperação Ambiental da Área Mineira de São Domingos. <https://edm.pt/projetos/recuperacao-do-sistema-de-canais-de-recolha-de-aguas-de-escorrencia/>. Consultado em 31 de janeiro de 2025.
- [6] Santos Oliveira, J. M., Farinha, J., Matos, J. X., Ávila, P., Rosa, C., Machado, M. J. C., Daniel, F. S., Martins, L., Leite, M. R. M. (2002). Diagnóstico Ambiental das Principais Áreas Mineiras Degradadas do País. Boletim de Minas – Instituto Geológico e Mineiro (IGM) 39(2), 67-85.
- [7] Guanter, L., Kaufmann, H., Segl, K., Foerster, S., Rogass, C., Chabrillat, S., Kuester, T., Hollstein, A., Rossner, G., Chlebek, C., Straif, C., Fischer, S., Schrader, S., Storch, T., Heiden, U., Mueller, A., Bachmann, M., Mühle, H., Müller, R., Habermeyer, M., Ohndorf, A., Hill, J., Buddenbaum, H., Hostert, P., van der Linden, S., Leitão, P., Rabe, A., Doerffer, R., Krasemann, H., Xi, H., Mauser, W., Hank, T., Locherer, M., Rast, M., Staenz, K., Sang, B. (2015). The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. *Remote Sens.* 2015, 7(7), 8830-8857.
- [8] Mouazen AM, Nyarko F, Qaswar M, Tóth G, Gobin A, Moshou D. Spatiotemporal Prediction and Mapping of Heavy Metals at

Regional Scale Using Regression Methods and Landsat 7. *Remote Sensing*. 2021; 13(22):4615.

[9] Shi S, Hou M, Gu Z, Jiang C, Zhang W, Hou M, Li C, Xi Z. Estimation of Heavy Metal Content in Soil Based on Machine Learning Models. *Land*. 2022; 11(7):1037.

[10] Aggarwal, CC, Kong X, Gu Q, Han J, Yu, PS. Active learning: A survey. In *Data Classification: Algorithms and Applications* (pp. 571-605). CRC Press, 2014.

[11] Domingues, I. (2020). *Ecophysiological Characterization of Metallophyte Species Candidates for Phytoremediation* (Master's thesis, Universidade de Lisboa (Portugal)).