

ACADEMIA DAS CIÊNCIAS DE LISBOA
MONOGRAFIAS • VOLUME 6

BACIA CARBONÍFERA DO DOURO:
NOVOS DESENVOLVIMENTOS

M. J. Lemos de Sousa e Cristina F. A. Rodrigues
Editores



LISBOA • 2025

Título: Bacia Carbonífera do Douro: Novos Desenvolvimentos

Editores: M. J. Lemos de Sousa e Cristina F. A. Rodrigues

Série: Monografias da Academia das Ciências de Lisboa — Vol. 6

Edição: Academia das Ciências de Lisboa (<https://www.acad-ciencias.pt/>)

Data de edição: novembro de 2025

ISBN: 978-972-623-422-7

DOI: <https://doi.org/10.58164/9265-8123>

Bacia Carbonífera do Douro:

Novos Desenvolvimentos

M. J. Lemos de Sousa e Cristina F. A. Rodrigues
Editores

ÍNDICE

Apresentação	V
Bacia Carbonífera do Douro: Novos desenvolvimentos Inventário dos progressos 2010-2025 e introdução ao presente volume <i>M. J. Lemos de Sousa, Cristina F. A. Rodrigues e P. F. Moreira</i>	1
Investigações geológico-mineiras na região envolvente da mina de carvão de Germunde (NO de Portugal): a subsidência mineira revisitada <i>Helder I. Chaminé, António Gaspar, Carlos M. Arraist e Carlos Dinis da Gama</i>	17
Bacia Carbonífera do Douro: Hidrogeologia e Hidrogeoquímica <i>Renata Santos</i>	47
Escombreyas em autocombustão na Bacia Carbonífera do Douro: Processos, impactes ambientais e monitorização <i>Deolinda Flores, Ana Cláudia Teodoro, Armindo Melo, Catarina Mansilha, Duarte Viveiros, Joana Ribeiro, João Ferreira, Jorge Espinha Marques, José Luís Santos, José Manuel Batistat, Lia Duarte e Patrícia Santos</i>	75
CO ₂ Geological storage in coal: Risk Assessment <i>L. Ribeiro e Sousa, R. Leal e Sousa, Zhang Ruand and Eurípedes Vargas Jr.</i>	117
Robert Wagner (1927 – 2018): Paleobotânico e Estratígrafo <i>M. J. Lemos de Sousa, Cristina F. A. Rodrigues e P. F. Moreira</i>	147

APRESENTAÇÃO

A Bacia Carbonífera do Douro (BCD) é, como se sabe, a parte da Bacia do Douro que contém camadas de carvão, estendendo-se, por cerca de 35 km, entre São Pedro Fins (Maia) e Paraíso (Castelo de Paiva). A denominação de Bacia Carbonífera do Douro, deve-se a Severino Monteiro e João Augusto Barata, em trabalho publicado em 1889, tendo precisamente em vista diferenciar o troço da Bacia do Douro contendo camadas de carvão, constituindo, aliás, a principal bacia carbonífera portuguesa. Trata-se, assim, de uma designação com conotação exclusivamente mineira – e não estratigráfica –, independentemente do facto de, por coincidência, a datação geológica da Bacia do Douro coincidir com o período Carbonífero.

A história mineira da Bacia Carbonífera do Douro é, como a de todas as congéneres mundiais, complexa. Assim, a despeito de haver notícia de, nos finais do século XVIII (1795) se ter descoberto e extraído carvão em Ervedosa, a exploração regular (na região de São Pedro da Cova) iniciou-se, apenas, em 1804-1808, já sob os auspícios do então intendente-geral de minas José Bonifácio de Andrada e Silva.

Aquando da reformulação do registo mineiro em 1836, as concessões mineiras de carvão da BCD correspondiam, oficialmente, em 1971, a 32 minas, a maioria das quais integravam 4 coutos mineiros (Valdeão, São Pedro da Cova, Pederneira e Pejão). As pequenas minas foram sendo abandonadas a partir dos anos 50 do século XX, sendo que, os coutos mineiros que continuaram em lavra, i.e., São Pedro da Cova e Pejão, mantiveram-se em atividade até 1972 e 1994, respetivamente. O fecho das minas foi irreversível, tendo em conta dois fatores: (i) os custos de exploração resultantes da estrutura do jazigo *vs.* o valor comercial do carvão e (ii) a qualidade do carvão, incompatível com as leis ambientais europeias.

Os carvões da Bacia Carbonífera do Douro foram utilizados como combustível, tanto para usos domésticos como industriais, principalmente durante as duas guerras mundiais.

Na verdade, à parte pequenos contingentes destinados a cimenteiras e o uso em experiências de redução direta de minério de ferro, os carvões durienses foram, essencialmente, utilizados na produção de eletricidade em centrais térmicas. Desde logo, no decurso da Segunda Guerra Mundial e, mesmo, até muito depois do fim do conflito, a Central de Massarelos, da Companhia Carris de Ferro do Porto, assegurou todo o transporte coletivo da cidade no único meio então existente, i.e., o carro elétrico. A Central foi abastecida, em exclusivo, pelas minas do Couto Mineiro de São Pedro da Cova e, os da altura, todos se lembram do incessante vaivém das chamadas “zorras” (veículos de tração elétrica da Companhia dos Carris, adaptados para transporte de cargas), transportando carvão das minas para a central e, de volta, da central para as escombreyras da mina, os resíduos de combustão. Existe um desses veículos conservado no Museu Mineiro de São Pedro da Cova.

Depois, já nos anos 60 do século XX, foi o carvão do Couto Mineiro do Pejão que passou a alimentar, por teleférico, a Central Termoelétrica da Tapada do Outeiro (Gondomar), a qual, hoje, continua em pleno funcionamento, reconvertida para utilizar como combustível gás natural.

Já quanto ao uso doméstico (cozinha e aquecimento) há, ainda, memória de um outro teleférico, entre o Couto Mineiro de São Pedro da Cova e o chamado Monte Aventino – zona da cidade do Porto localizado entre a atual Praça de Velasquez e o estádio das Antas –, onde se localizava o depósito da companhia mineira na cidade do Porto, a partir do qual o carvão era distribuído granulado, ou em briquetes, por camionagem. A empresa das minas do Pejão, por sua vez, possuía depósitos idênticos no Freixo e em Campanhã onde o carvão chegava por barco transportado através do rio Douro. Existia, ainda, uma fábrica de briquetes do Pejão, nos arredores do Porto, em Rio Tinto. Ficaram na memória dos contemporâneos os cartazes de propaganda dos “Briquetes Pejão – o melhor e mais barato carvão de cozinha” (sic), elaborados por artistas consagrados e ubiquamente difundidos!

Não existem estatísticas fiáveis das quantidades totais de carvão exploradas no conjunto da BCD, sendo que o número avaliado, por vários autores, para a produção entre 1894 e o fecho das minas é de 2×10^6 t. Com efeito, as únicas estatísticas oficiais disponíveis permitem, apenas, afirmar que o carvão produzido na BCD entre 1950 e 1982 cifra-se em $11,6 \times 10^6$ t, o que dá uma ideia da importância relativa desta bacia no enquadramento no setor mineiro nacional.

Há, contudo, um outro facto, verdadeiramente, relevante no que respeita aos carvões durienses! Trata-se dos carvões formados em regime de evolução normal em bacia – i.e., obedecendo à lei de Hilt e ao enquadramento, sem desvios, nos diagramas de van Krevelen e de Karweil – comprovadamente mais evoluídos do Continente Norte-Atlântico, tal como atestado por modernos estudos da Petrologia e Geoquímica Orgânicas. Com efeito, os carvões da BCD correspondem, na classificação internacional da norma ISO 11760, à Antracite A, também conhecida por metantracite ou perantracite, sendo que a definição desta qualidade de carvão foi, pela primeira vez, proposta em termos quantitativos tendo por base o estudo dos carvões durienses. Mais ainda, foi o estudo pormenorizado destes mesmos carvões que permitiu completar as zonas de valores mais elevados conhecidas das “curvas gerais da incarbonização”.

Um jazigo e uma mina, porém, não são só o minério aí existente ou explorado. Na verdade, qualquer minério foi formado e acha-se integrado em uma ou, na maioria dos casos, em várias formações geológicas com a sua história e estrutura.

A BCD teve a sua génese no Carbonífero da Europa Ocidental, de fácies exclusivamente continental, achando-se enquadrada na estrutura geral local do Anticlinal de Valongo e suas extensões, o que justifica a abundantíssima quantidade de publicações científicas que lhe foram dedicadas, para lá da Petrologia e Geoquímica Orgânicas, também nos subdomínios da Estratigrafia e da Paleontologia, desde o trabalho pioneiro de Daniel Sharpe, datado de 1832.

Este autor, que não tendo compreendido a estrutura do Anticlinal de Valongo e a inversão do seu flanco SO, fez uma interpretação totalmente errada da geologia local. Na verdade, só em 1853 (data do manuscrito) é que Carlos Ribeiro esclareceu cabalmente o assunto, corrigindo a interpretação errada de Sharpe, estudos estes subsequente e formalmente publicados, a partir de 1856, numa série de importantíssimas monografias editadas nas então *Memórias da Academia Real das Sciencias de Lisboa*. Seguiram-se os trabalhos monográficos de Bernardino António Gomes, Oswald Heer, Wenceslau de Sousa Pereira de Lima e outros sobre Paleobotânica e foi um nunca mais parar de importantes publicações até hoje, o que atesta a importância científica da BCD e do seu enquadramento geológico.

Para além de várias centenas de artigos, a BCD já foi objeto de estudo em nada menos de que sete teses de doutoramento, todas do domínio da Geologia, e treze teses de mestrado, maioritariamente do domínio das Ciências da Terra, mas também históricas e/ou sobre Arquitetura e Ordenamento do Território.

Com o fim da atividade mineira de exploração de carvão na BCD terminou aqui a história? De maneira nenhuma. Diríamos, mesmo, pelo contrário! Com efeito, o fecho de uma qualquer mina implica, desde logo, a aplicação de regras ambientais relativas, por exemplo, ao estudo da subsidência mineira, à circulação de águas e ao estudo das escombreyras. Por outro lado, casos há – e a BCD é um deles – em que o minério ainda aí existente pode vir a ter utilidade, embora em enquadramento diferente do utilizado antes do fecho.

É o que se demonstrou, com êxito, com a elaboração de três teses de doutoramento levadas a efeito já após o fecho de todas as minas: uma sobre o potencial de grafitização das Antracites A durienses, outra, sobre os problemas ambientais relacionados com as escombreyras e, outra ainda, sobre os problemas de hidrologia subsequentes ao encerramento das minas. Foi, outrossim, levado a efeito um projeto europeu para estudar as principais consequências da subsidência mineira.

Neste enquadramento, a presente monografia vem, pois, juntar-se às contribuições surgidas após o fecho das minas da BCD, tendo sido organizada de modo a incorporar, para além de um capítulo de síntese dos desenvolvimentos havidos entre 2010 e 2025 (a anterior síntese, datada de 2010, publicada no âmbito da edição dos três volumes comemorativos do Ano da Terra, carecia, passados quinze anos, de atualização), os resultados do estudo da subsidência mineira, da hidrogeologia e da hidrogeoquímica, de um estudo de geologia ambiental sobre incêndios em escombreyras e, *last, but not least*, um artigo teórico sobre o problema do risco no caso da sequestração geológica de CO₂ em jazigos de carvão desativados. Com efeito, a BCD pode constituir um campo privilegiado para a sequestração geológica de CO₂ (segundo estimativa fiável, ainda aí existem c. de 10x10⁶ t de carvão) para cuja exequibilidade há que desenvolver um projeto de fundo. Ora, da lista de requisitos básicos para a criação de um “depósito geológico de CO₂”, a diretriz europeia sobre o tema impõe, naturalmente, o estudo do risco. Com o estudo aqui publicado, da autoria de

especialista com crédito firmado no tema, pretende-se, assim, contribuir para continuar a inovar, vaticinando longa vida útil no futuro da Bacia Carbonífera do Douro. Tal objetivo coincide, aliás, com o lema da Academia das Ciências de Lisboa *Nisi utile est quod facimus stulta est gloria* (Se não é útil o que fazemos, vã é a glória), no âmbito do qual se apresentam e se assumem os capítulos que incorporam o presente volume temático, o qual termina com um estudo biobibliográfico que pretende honrar a memória de Robert Wagner que, tal como aí se explica, deu importantes contributos ao estudo de base da bacia.

Porto, outubro de 2025

M.J. Lemos de Sousa e Cristina Rodrigues, Editores

Agradecimentos

São devidos agradecimentos às seguintes entidades e pessoas:

1. À Fundação e Universidade Fernando Pessoa, pela sua contribuição na formatação inicial do volume em InDesign, através do Laboratório de Rádio e Hipermedia, pela mão competente da Doutora Ana Gabriela Nogueira.
2. À Professora Engenheira Isabel Ribeiro pela cuidadosa, muito pormenorizada e diligente revisão crítica do manuscrito.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do Projeto do MARE (Centro de Ciências do Mar e do Ambiente) referência UID/04292/2025.

Bacia Carbonífera do Douro: Novos desenvolvimentos Inventário dos progressos 2010-2025 e introdução ao presente volume

M.J. LEMOS DE SOUSA^{1,2,3*}, CRISTINA F.A. RODRIGUES^{1,2,3} E P.F. MOREIRA^{1,2}

¹Fundação e Universidade Fernando Pessoa – Instituto de Investigação,
Inovação e Desenvolvimento Fernando Pessoa (FP-I3ID). Porto, Portugal

²MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente. URI Coimbra, Portugal

³Academia das Ciências de Lisboa (ACL). Lisboa, Portugal

*E-mail: lemosdesousa@gmail.com

RESUMO

A Bacia do Douro (Estefaniano C Inicial), compreendendo a Bacia Carbonífera do Douro, corresponde a uma das bacias datadas do Período Carbonífero que ocorre na estrutura designada por Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (NO de Portugal).

Os autores apresentam uma síntese histórica dos mais recentes estudos levados a efeito sobre as entidades geológicas referidas e, bem assim, do desenvolvimento da atividade mineira e da caracterização dos carvões aí explorados.

Por último, fazem referência às principais ações desenvolvidas após o fecho das minas (subsidência mineira, hidrogeologia/problemas, hidrogeoquímica, hidromecânica e impacto ambiental das escombreyras resultantes da mineração, contaminação de solos e incêndios por autocombustão) e discutem e apresentam caminhos para potenciais novas utilizações dos recursos de carvão remanescentes (grafitização e sequestro/armazenamento geológico de CO₂).

Palavras-chave: Bacia do Douro, Bacia Carbonífera do Douro, Estefaniano C Inicial, Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão, Paleobotânica, Minas de carvão, Subsidência mineira, Hidrogeologia, Escombreyras, Contaminação de solos, Autocombustão, Gravitização, Armazenamento geológico de CO₂.

ABSTRACT

The Douro Basin (Early Stephanian C), which comprises the Douro Coalfield, is part of the Douro-Beira Carboniferous Trough (NW Portugal).

The authors present a general historical account of the main recent issues with regard to these geological bodies, as well as, to the collieries and the coal characterization.

The actions taken after the mine closure (the study of mining subsidence, groundwater pathways and related geological, hydrogeochemical and hydromechanical features, as well as the environmental impacts of mining waste piles, soil contamination, and self-burning

occurrences), followed by the discussion of new potential utilizations for the remaining coal resources (graphitization and CO₂ geological storage) are also referred.

Key-words: Douro Basin, Douro Coalfield, Early Stephanian C, Dúrico-Beirão Carboniferous Trough, Palaeobotany, Coal mines/Collieries, Mining subsidence, Hydrogeology, Mining waste piles, Soil contamination, Self-burning, Graphitization, CO₂ geologic storage.

1. INTRODUÇÃO

No enquadramento das comemorações do Ano da Terra, em 2010, foi possível organizar três volumes comemorativos que constituem uma excelente síntese do estado da arte do conhecimento geológico tanto de Portugal como das ex-colónias.

Para o caso que nos interessa, i.e., o da Bacia Carbonífera do Douro (BCD), regista-se que se encontram publicados nos referidos volumes três capítulos de síntese: um sobre *O Carbonífero em Portugal* (Pinto de Jesus et al. 2010¹), outro sobre os *Carvões Portugueses: Petrologia e Geoquímica* (Lemos de Sousa et al. 2010a) e, outro ainda, especificamente sobre a potencial revalorização da BCD em termos de futuro dos carvões portugueses, com especial incidência no caso das antracites que ocorrem da Bacia Carbonífera do Douro (Lemos de Sousa et al. 2010b).

Entretanto, em 2012, editamos um novo livro – *O Carvão na Actualidade* – em que se inclui uma síntese, ainda mais atualizada, sobre os temas acima referidos (Cunha et al. 2012). Nos trabalhos de síntese acima referidos são citados de forma exaustiva os estudos realizados até 2010, para os quais se remete o leitor. No presente trabalho, centrar-nos-emos sobretudo nos desenvolvimentos posteriores, retomando os estudos anteriores apenas quando for indispensável esclarecer conceitos. É o caso do conceito de **Bacia Carbonífera do Douro**, que, como veremos, tem levado a não poucos equívocos e, até, a lamentáveis confusões e que, por isso, importa, antes de mais, recordar e precisar.

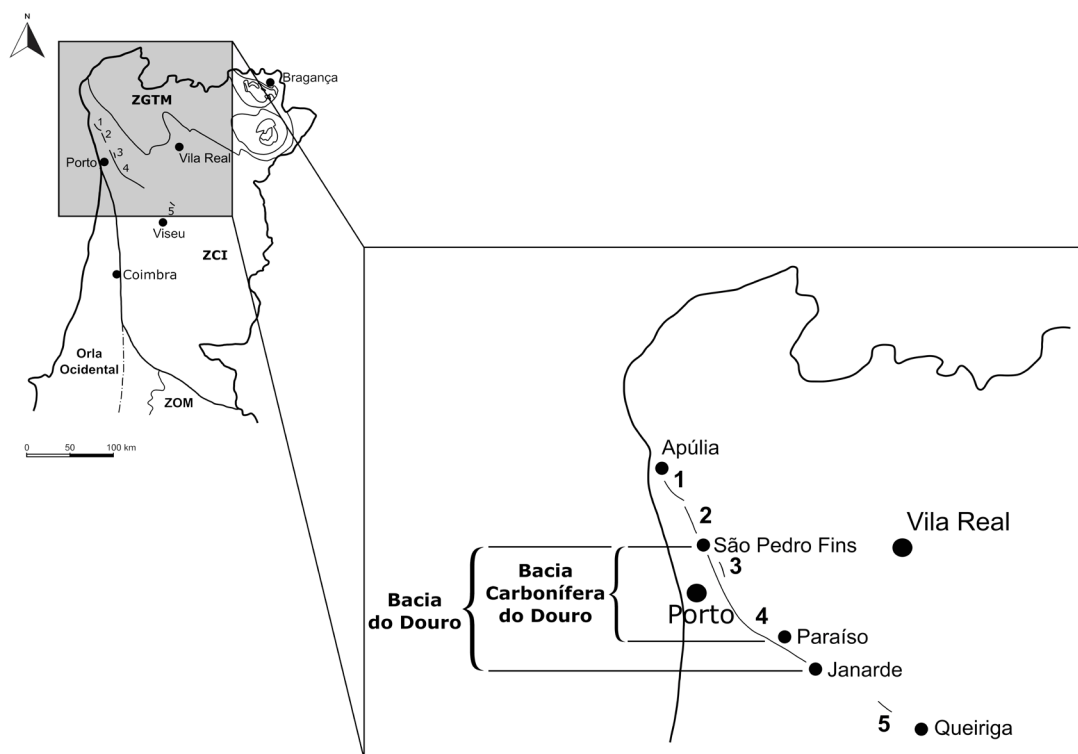
2. BACIA CARBONÍFERA DO DOURO vs. BACIA DO DOURO

A **Bacia Carbonífera do Douro** ou Bacia Carbonífera Duriense (Figura 1) é constituída por uma faixa de terreno, cuja subidade geológica corresponde ao Estefaniano C Inicial, de fácies inteiramente continental, a qual, com orientação geral NO-SE, se estende, por cerca de 35 km, desde São Pedro Fins (concelho da Maia) até Paraíso (concelho de Castelo de Paiva).

A designação em causa está intrínseca e exclusivamente ligada à presença de camadas de carvão

¹ Neste trabalho apresenta-se, pela primeira vez, um estudo extensivo de autoria de Rui Dias, sobre o enquadramento do Carbonífero português no contexto das zonas geotectónicas da Península Ibérica.

Estamos, aliás, convencidos de que boa parte das confusões estabelecidas a respeito da correta definição de Bacia Carbonífera do Douro, resulta do facto de vários autores, alguns de referência, listados em Lemos de Sousa (1978), terem confundido Bacia Carbonífera do Douro com **Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão** (SCDB).



1. Afloramento Criaç-Serra de Rates; 2. Afloramento Casais-Alvarelos/Serra de Bougado; 3. Afloramento Ervedosa/Valongo; 4. Bacia do Douro (inclui a "Bacia Oriental" e o afloramento de Sete Casais) vs Bacia Carbonífera do Douro; 5. Afloramento Arco-São Miguel.

ZGTM – Zona Galiza – Trás-os-Montes; ZCI – Zona Centro-Ibérica; ZOM – Zona Ossa-Morena.

Ora, esta última designação corresponde a uma estrutura geológica, igualmente, de orientação geral NO-SE, a qual se estende entre a Apúlia (concelho de Esposende) e Queiriga (concelho de Vila Nova de Paiva), sendo apenas interrompida pelo maciço de rochas graníticas de Castro Daire.

No caso do SCDB, o termo “Carbonífero” utilizado na designação corresponde, neste caso sim, a um nome que designa o intervalo de tempo geológico em que se depositaram as diferentes formações sedimentares aí presentes, todas datadas do Período Carbonífero. Com efeito, no SCDB verificamos de NO-SE, as seguintes ocorrências demonstrativas de episódios sedimentares em diferentes idades/subidades revistas, primeiro, em Lemos de Sousa e Wagner (1983) e, subsequentemente, em Wagner e Álvarez-Vázquez (2010). Considerando as últimas propostas de tabela estratigráfica do Carbonífero Continental definidas para a Europa Ocidental (Wagner e Winkler Prins 2016; Wagner 2017) temos:

- (i) Afloramento de Criad-Serra de Rates (tendo em conta a provável correlação com o afloramento de Casais-Alvarelhos) – Bolsoviano (antigo Vestefaliano C);
- (ii) Casais-Alvarelhos/Serra de Bougado – Bolsoviano (antigo Vestefaliano C);
- (iii) Ervedosa/Valongo – Asturiano (antigo Vestefaliano D);
- (iv) Bacia do Douro, incluindo a chamada “bacia oriental” e parte da ocorrência de Sete Casais (Estefaliano C);
- (v) Arco e São Miguel (Carbonífero de idade indeterminada).

A estrutura principal do conjunto referido é, sem dúvida, a **Bacia do Douro (conceito geológico)**, que se estende de São Pedro Fins (concelho da Maia) até Janarde (concelho de Arouca) ao longo de cerca de 50 km, raramente ultrapassando os 500 m de largura. A orientação geral das camadas da Bacia do Douro é, aproximadamente, $N130^{\circ}\pm 10^{\circ}E$, apresentando inclinações, quase sempre para o quadrante NE, entre 45° e 90° . A **Bacia Carbonífera do Douro (conceito mineiro)** corresponde, como referido, apenas ao troço da bacia sedimentar em que ocorrem camadas de carvão, i.e., entre São Pedro Fins e Paraíso.

Nota:

Do acima exposto, decorre que a designação correta de Bacia Carbonífera do Douro em inglês é ***Douro Coalfield*** e, nunca, *Douro Carboniferous Basin*, já que esta última designação, quando grafada em inglês, se refere exclusivamente à datação geológica e não à presença de camadas de carvão. Outro erro frequente – com origem, seguramente, nos tradutores automáticos, destinados ao uso corrente, mas, com frequência, totalmente incompetentes em matéria de terminologia científica e técnica especializada – é usar *Coalfield* na aceção de mina de carvão. De facto, “mina de carvão” em inglês é, simplesmente, *coal mine* ou *colliery*, neste último caso quando se queira referir todo o conjunto mineiro, incluindo as instalações, e não apenas a mina em si (exemplos: ***Germunde coal mine*** ou ***Germunde colliery***, respetivamente).

Por fim, há que referir que embora não exista uma designação em inglês para o conceito de “Couto Mineiro”, é tradicionalmente aceite a tradução para *Coal District* (exemplos: ***Peção Coal District***; ***São Pedro da Cova Coal District***).

3. PROGRESSOS NO CONHECIMENTO DA BACIA CARBONÍFERA DO DOURO E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS: DESCRIÇÃO E COMENTÁRIOS

3.1. Introdução

Tendo em conta as sínteses anteriormente publicadas, referidas no item anterior, limitamos, naturalmente, a descrição aos desenvolvimentos subsequentes a 2010, aos quais correspondem, aliás, numerosas contribuições, algumas verdadeiramente importantes, integrando temáticas bem diversas, que trataremos separadamente. Dado que a BCD se enquadra no âmbito geológico mais vasto da Bacia do Douro, é óbvio que, em muitos casos, acabamos por ter de referir contribuições verificadas no conhecimento de ambas as unidades.

3.1.1. Contribuições gerais e de índole histórica

Neste contexto, há que referir uma importante contribuição para a história mineira, dada à estampa por iniciativa de José Manuel Brandão, sobre uma proposta tardia de arrendamento das minas de carvão do Porto (obviamente as da BCD) e de Buarcos (Couto Mineiro do Cabo Mondego) (Brandão 2020; Brandão e Vernon 2021) e, ainda, um volume de memórias sobre o Couto Mineiro do Pejão (Pereira 2020).

No que toca à bibliografia geral recente há, quanto a nós, ainda que referir uma tese de arquitetura sobre arqueologia industrial com eventual e potencial recuperação paisagística da mina de Germunde (Soares 2021).

A BCD em particular e, mesmo, a estrutura geral associada do Anticlinal de Valongo, constituem, desde sempre, importante tema ligado ao ensino prático das Ciências da Terra e, designadamente, da Estratigrafia, Paleontologia e Petrologia e Geoquímica Orgânicas do Paleozoico português. Prova da importância referida é a publicação de um recente trabalho de âmbito didático sobre a bacia (Oliveira et al. 2014).

3.1.2. Contribuições para o conhecimento da Geologia e da Paleontologia

A Bacia do Douro encontra-se intimamente ligada à estrutura geológica do Anticlinal de Valongo. De facto, tendo em atenção os contributos à data de 2010-2012, o limite SO da Bacia do Douro corresponde a uma discordância angular, com inconformidade, dos depósitos do muro da Bacia do Douro sobre os do Complexo xisto-grauváquico anteordovícico^{2,3}. A NE, os corpos

² Unidade inicialmente definida por Teixeira (1955) como “Complexo xisto-grauváquico ante-ordoviciano” e aqui, simplesmente, atualizado para a terminologia atual no que respeita quer à Estratigrafia, quer à ortografia atualmente vigente.

³ A revisão desta unidade litoestratigráfica está em curso. Estamos, todavia, convictos que os afloramentos desta unidade presentes no Anticlinal de Valongo se relacionam (correlacionam?) com o denominado Grupo das Beiras.

sedimentares do teto da Bacia do Douro são truncados por falha inversa, a qual faz com que as camadas do Paleozoico Inferior, estruturadas no flanco inverso do Anticlinal de Valongo, cavalguem as camadas carboníferas. No setor de São Pedro da Cova a estrutura tectónica é bastante complexa e a ramificação dos acidentes tectónicos provocou, por escamização, a formação da chamada “bacia oriental”. Em provável relação com o mesmo tipo de tectónica, nos setores tanto de São Pedro da Cova como de Germunde, afloram, no interior da faixa carbonífera, terrenos do Paleozoico Inferior, os quais se encontram, geralmente delimitados por contactos estratigráficos e por contactos tectónicos, a NE e a SO, respetivamente.

O registo estratigráfico é, hoje, conhecido em pormenor em termos de unidades tectonosedimentares (UTS) e, bem assim, quer quanto ao modelo de deposição, quer quanto à evolução tectónica e à estrutura atual (Lemos de Sousa et al. 2010a,b; Cunha et al. 2012).

As contribuições posteriores a 2010 para o conhecimento da Geologia e da Paleontologia da BCD e, mais alargadamente, da Bacia do Douro são as seguintes:

(i) Quanto à Geologia propriamente dita, Lemos de Sousa et al. (2013) publicou um estudo de pormenor sobre o célebre caso do erro de interpretação de Daniel Sharpe, em 1848, reconhecido por Carlos Ribeiro já em 1858, mas apenas formalmente dado a conhecer em publicações deste último autor, datadas de 1862 e 1863, incluindo o corte geológico entre a Foz do Douro e Baltar com a interpretação correta da situação. O assunto refere-se à interpretação errada por parte de Sharpe quanto à estrutura do Anticlinal de Valongo, uma vez que não identificou a inversão do flanco SE do anticlinal sobre as formações do Carbonífero, o que levou o autor britânico a considerar os carvões durienses como sendo do Silúrico Inicial (leia-se, hoje, Ordovício).

Por outro lado, uma tese de mestrado (Machado 2017) retomou o tema multidisciplinar da geologia da região da BCD ao estudar uma secção geotransversal entre a Serra de Santa Justa (conselho de Valongo) e Fânzeres (conselho de Gondomar).

Há ainda que referir a recente e importante síntese atualizada sobre o Carbonífero continental português, dada à estampa por Pinto de Jesus (2019), enquadrada no volume 2 da obra de referência *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*, editada por Cecílio Quesada e José Tomás de Oliveira.

Por último, cabe assinalar a saída a público – precisamente na hora de ultimar a formatação do manuscrito final do presente volume – de um artigo (Costa et al. 2025), o qual na sequência de uma tese de mestrado da primeira autora sobre a assinatura geoquímica das antracites A da BCD (Costa 2021) e de dois outros artigos (Costa et al. 2022, 2023), nos dá a conhecer uma série de novos dados que, no conjunto, permitem conhecer, em pormenor, as condições, designadamente paleoambientais, da génese da BCD e, mais genericamente, da estrutura maior da própria Bacia do Douro em que a BCD se insere.

(ii) É no campo da Paleontologia que se encontram as contribuições recentes mais significativas. Tal progresso deve-se, essencialmente, a Pedro Correia e colaboradores, a partir de investigações

levadas a cabo no Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências do Porto. Na verdade, as publicações originais cujos autores pertencem ao grupo de trabalho centrado no investigador referido são, para além de real qualidade científica, numerosíssimas. Este facto justifica que aqui não se refira nem descreva, em pormenor, a maioria destas publicações, até porque a sua referência pormenorizada sairia do âmbito do presente trabalho, uma vez que tais contributos se referem a estudos de Paleobotânica e de Paleozoologia de pormenor, com a frequente criação de novos *táxones*. Nesse sentido, permitimo-nos, apenas, destacar aqui três contribuições de síntese que constituem marcos importantes, não só no progresso dos conhecimentos da Bacia do Douro em si, mas também pelas implicações para a Geologia do Carbonífero em geral. Cabe, assim, referir a tese de doutoramento de Pedro Correia (Correia 2016), na qual, na sequência de trabalhos anteriores, abordou, pela primeira vez, o estudo da macroflora fóssil da bacia no enfoque da moderna Paleoeecologia⁴. Entretanto, foi dado à estampa o que consideramos um dos mais significativos progressos no conhecimento atual da macroflora do Estefaniano C Inicial português, ou seja, o estudo da flora resultante de novas colheitas nos afloramentos do Alto da Bela, no concelho de Valongo (Correia et al. 2017), estudo este que, por extensão, levou a importantes – embora algumas quicá discutíveis – considerações paleogeográficas gerais (Correia e Murphy 2020).

Por último, entendemos ser muito importante também aqui registar que o conjunto dos importantes estudos conduzidos por Pedro Correia e colaboradores confirma o intervalo de tempo em que se considera ter tido lugar a génese da Bacia do Douro, i.e., o correspondente ao Estefaniano C Inferior (veja-se, também Pinto de Jesus 2019).

Nota:

Constitui grave erro datar as formações do Carbonífero da Bacia do Douro do Gzheliano. Na verdade, tal só pode resultar do desconhecimento da metodologia e das decisões desenvolvidas pela União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS), da respetiva Comissão de Estratigrafia e suas Subcomissões, patentes no Guia Estratigráfico Internacional (Salvador 1994).

Com efeito, o facto do Gzheliano constar, atualmente, do Quadro das Divisões Estratigráficas Internacionais, apenas significa que, no estado atual dos conhecimentos, corresponde às formações que melhor representam o Carbonífero a nível mundial, servindo, assim, de referência, mas, note-se bem, apenas de referência. Trata-se, na verdade, de formações de fácies marinhas, obviamente as melhores para figurarem num quadro internacional. Contudo, como em muitos outros casos (o Ordovícico constitui um excelente outro exemplo, com as suas sete escalas regionais autorizadas para além da que, atualmente, constitui a de referência e que, por isso, figura no quadro internacional, i.e., a da Baltuscândia), a Comissão/Subcomissões de Estratigrafia da IUGS estabelecem e autorizam quadros regionais quando não é possível utilizar o quadro internacional. Ora, é o caso do Carbonífero da Europa Ocidental (Cardoso et al. 2023a,b), quando se trate de formações de fácies exclusivamente continental, tal como no caso da Bacia do Douro. Por tal motivo, quando se quer referir o intervalo de tempo geológico em que se formou

⁴ Uma tese de mestrado (Barbosa 2022) abordou, entretanto, problemas de foro de Paleoeecologia que merecem ser aqui também destacados.

a Bacia do Douro, a única forma correta de o referir é: “Bacia cuja formação data do Estefaniano C Inferior que, no quadro internacional, corresponde ao Gzheliano”.

Já quanto à utilização do termo Pensilvaniano o caso é diferente. A Subcomissão do Carbonífero da Comissão de Estratigrafia da IUGS aprovou e recomenda o termo Pensilvaniano para, em qualquer caso e com a categoria de Subsistema, designar o “Carbonífero Superior”. Contudo, a nível europeu, o termo Silesiano continua a ser comumente utilizado, embora de forma informal, quando se quer referir o Subsistema em que se enquadra o Carbonífero da Europa Ocidental, sobretudo quando se trata de fácies inteiramente continentais.

3.1.3. Contribuições decorrentes de problemas resultantes do fecho das minas de carvão da BCD: Remediação ambiental

Como é bem sabido (Cunha et al. 2012), a descoberta e exploração de carvão na BCD teve lugar a partir de 1795 em Erverdosa⁵, na região de São Pedro da Cova (concelho de Gondomar). A exploração de carvão foi, outrossim, concessionada em várias minas ao longo de toda a bacia, tendo sido especialmente importante nas áreas dos dois principais Coutos Mineiros: São Pedro da Cova, na margem direita do rio Douro (concelho de Gondomar) e Pejão, na margem esquerda do rio Douro (concelho de Castelo de Paiva). A exploração no Couto Mineiro de São Pedro da Cova terminou em 1972 e, no Couto Mineiro do Pejão (mina de Germunde), em 1994.

Ora, sempre que de encerramento de atividade mineira se trate daí resulta uma série de consequências do foro quer da Engenharia de minas/Geotecnia (é o caso do que se designa por “subsistência mineira”) quer, em termos mais genéricos, da temática geral das Ciências do Ambiente, neste último caso está implicado, na prática, o conceito de “remediação ambiental”, como, por exemplo, no que respeita à Hidrogeologia em geral, incluindo o tema dos efluentes mineiros, e ao estudo multifacetado das escombreyas resultantes da atividade mineira, incluindo tanto a contaminação de solos como a autocombustão de resíduos.

É abundante a bibliografia relativa aos vários aspetos referidos. Com efeito, em 2008, foi dada à estampa uma tese de doutoramento que trata, em pormenor, da Hidrogeologia e da Hidrogeoquímica gerais da área envolvente do Couto Mineiro do Pejão, designadamente da mina de Germunde (Santos 2008)⁶, cujos resultados da investigação então desenvolvida são, em resumo e no essencial, apresentados pela autora, Renata Santos, no presente volume, tal como mencionado no item 4.

Por outro lado, o Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto tem levado a cabo um vastíssimo programa de estudos geoambientais, incluindo teses de mestrado e doutoramento, e, ainda, numerosos

⁵ A exploração regular na região de São Pedro da Cova iniciou-se, apenas, em 1804-1808, sob os auspícios do então Intendente-Geral de Minas José Bonifácio Andrada e Silva. A primeira concessão oficial, i.e., sob registo, da bacia duriense data de 1854.

⁶ Foi, ainda, publicado um outro estudo hidrogeológico relativo a área contigua da mina de Germunde (Gomes 2014).

artigos de referência sobre:

- a) Efluentes (Teixeira 2012; Mansilha et al. 2021; Diogo et al. 2023)
- b) Contaminação de solos (Cunha 2013; Santos 2013; Santos et al. 2022,2023; Milinovic et al. 2024; Monteiro et al. 2024)
- c) Gestão de escomboreiras e autocombustão de resíduos (Ribeiro e Flores 2008; Ribeiro et al. 2010; Vila et al. 2010; Ribeiro 2011; Ribeiro et al. 2011)

O presente volume inclui um novo estudo original sobre a temática de autocombustão da autoria de Deolinda Flores e colaboradores.

3.1.4. Contribuições para a revalorização de recursos/reservas

Tendo em conta as suas características e particularidades analíticas bem conhecidas, as antracites A (= metantracites ou perantracites) que ocorrem na BCD, independentemente dos recursos/reservas que não foram explorados, não podem, hoje, ser utilizados como combustível, já que a isso se opõe a legislação europeia sobre a utilização de combustíveis sólidos fósseis.

Todavia, mesmo quando não utilizados como combustíveis tradicionais, os carvões podem ter um papel fundamental no futuro, quer como matéria-prima de outras tecnologias (por exemplo, a grafitação) quer, muito especialmente, como importante meio ligado à remediação ambiental, neste particular como excelente meio de sequestração e armazenamento geológico de CO₂ (EASAC 2013; Rodrigues et al. 2025) (Figura 2).

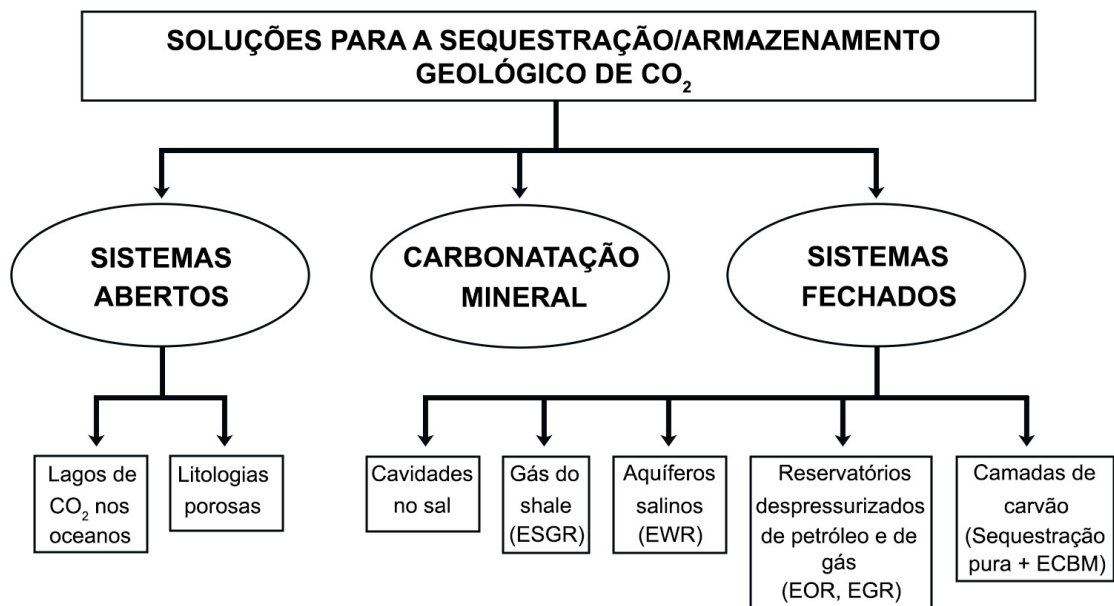
Em anterior trabalho de síntese sobre a potencial revalorização dos carvões da BCD (Lemos de Sousa et al. 2010b), encontra-se descrita em pormenor a problemática em causa, pelo que aqui apenas nos limitamos a referir o que, entretanto, se publicou. Assim:

(i) Quanto ao **potencial de grafitação** dos carvões durienses, foram elaborados vários artigos de referência sintetizados numa tese de doutoramento (Rodrigues 2012), sobre a qual foi dado à estampa um artigo de síntese (Rodrigues et al. 2014).

(ii) Quanto à **sequestração/armazenamento geológico de CO₂** na BCD, o que se encontra registado no anterior artigo citado continua válido, até pelo facto de nada ter sido ainda levado a cabo no que respeita à elaboração de um projeto.

Ora, entretanto, em três recentes capítulos de livro sobre a problemática da relação “transição energética e geologia” (Rodrigues et al. 2022, 2024, 2025) deixam bem claro que um dos fatores essenciais dessa relação é a sequestração/armazenamento geológico de CO₂, sendo certo que, para além de terem sido dadas à estampa duas teses de mestrado sobre a problemática (Sousa 2005; Gomes 2010), foi possível transpor para a legislação portuguesa (DR 2012) a diretiva europeia sobre o assunto (EU 2009), tarefa levada a efeito por um grupo de trabalho em que tiveram a honra de participar dois dos autores (MJLS e CFAR) do presente capítulo. Nas normativas legais referidas, uma das questões-chave do processo é, obviamente, o caso da segurança do depósito,

quer no decurso da injeção, quer no decurso do tempo subsequente ao armazenamento. É esse o motivo pelo qual como contribuição de base original foi elaborado o artigo sobre o assunto, incluído no presente volume, da autoria de Luís Ribeiro e Sousa e colaboradores, tal como registado no item 4.



Produtos de Recuperação em Tecnologias CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage* – Captação, Utilização e Armazenamento de Carbono):

ESGR – *Enhanced Shale Gas Recovery* (Recuperação avançada de Gás de Shale)

EWR – *Enhanced Water Recovery* (Recuperação avançada de Água)

EOR – *Enhanced Oil Recovery* (Recuperação avançada de Petróleo)

EGR – *Enhanced Gas Recovery* (Recuperação avançada de Gás)

ECBM – *Enhanced Coalbed Methane* (Recuperação avançada de Metano de Carvão em Camada)

Figura 2 – Sequestração/armazenamento geológico de CO₂: Estado da Arte (adaptado de Rodrigues et al. 2025).

4. O PRESENTE VOLUME

No seguimento do exposto nos itens anteriores, integram-se no presente volume as seguintes contribuições originais relativas à BCD apresentadas em sessões da Academia das Ciências de Lisboa, organizadas pelos académicos Manuel João Lemos de Sousa e Cristina Fernanda Alves Rodrigues:

(i) Comunicações apresentadas nas sessões da Classe de Ciências, realizadas em 30 de junho e em 15 de setembro de 2022, sobre a designação genérica da “Bacia Carbonífera do Douro – Novos desenvolvimentos”, a saber:

A) Apresentação geral

Comunicação, da autoria de M.J. Lemos de Sousa, Cristina F.A. Rodrigues e P.F. Moreira, intitulada *Bacia Carbonífera do Douro: Novos desenvolvimentos*.

B) Problemas decorrentes do fecho das minas de carvão da: BCD/Remediação ambiental

B1) Comunicação, da autoria de Helder I. Chaminé, António Gaspar, Carlos M. Arrais e Carlos Dinis da Gama, intitulada *Investigações geológico-mineira na região envolvente da mina de carvão de Germunde (NO de Portugal): a subsidência mineira revisitada*, relativa ao estudo pormenorizado da subsidência mineira e suas principais consequências.

B2) Comunicação, da autoria de Renata Santos, intitulada *Hidrogeologia e Hidrogeoquímica*, relativa ao estudo hidrogeológico e hidrogeoquímico da BCD, com especial incidência na área do Couto Mineiro do Pejão/Mina de Germunde.

B3) Comunicação, da autoria de Deolinda Flores, Ana Cláudia Teodoro, Armindo Melo, Catarina Mansilha, Duarte Viveiros, Joana Ribeiro, João Ferreira, Jorge Espinha Marques, José Luís Santos, José Manuel Batista, Lia Duarte e Patrícia Santos, intitulada *Escombreyras em autocombustão na Bacia Carbonífera do Douro: Processos, impactes ambientais e monitorização*, relativa ao estudo de autocombustão em escombreyras da BCD.

C) Revalorização de reservas

(C1) Comunicação, da autoria de L. Ribeiro e Sousa, R. Leal e Sousa, Zhang Ru e Eurípedes Vargas Jr., intitulada *CO₂ Geological storage in coal. Risk Assessment*, a qual, abordando e sintetizando o problema geral dos depósitos geológicos de CO₂, constitui o primeiro dos trabalhos de base conducentes a um potencial futuro projeto para o armazenamento geológico de CO₂ na BCD no enquadramento da legislação, europeia e portuguesa, existente (EU 2009, DR 2012).

(C2) Comunicação, apresentada na sessão da Classe de Ciências, realizada em 20 de maio de 2021, por M.J. Lemos de Sousa, Cristina F.A. Rodrigues e P.F. Moreira, intitulada *Robert Wagner (1927--2018): Paleobotânico e Estratígrafo*. Trata-se, neste caso, de um estudo biobibliográfico da obra de Robert Wagner, Paleobotânico e Estratígrafo de referência internacional, com especial referência às suas contribuições para o estudo do Carbonífero Continental de Portugal e, particularmente, da BCD.

AGRADECIMENTOS

À Fundação e Universidade Fernando Pessoa por: (i) Através da estrutura de coordenação para a investigação, Instituto de Investigação, Inovação e Desenvolvimento Fernando Pessoa (FP-I3ID), autorizar a inclusão do presente estudo no seu plano de trabalho e (ii) Pelo patrocínio correspondente ao trabalho gráfico de formatação do presente volume.

Aos colegas Ana Salgado e Henrique Pinheiro, pela colaboração prestada na revisão de vários manuscritos. À Ana Gabriela Nogueira, pela eficiente e competente tarefa de formatação final do livro.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, C.T., 2022. *Floristic Endemism of the Douro Carboniferous Basin with Description of New Species*. Universidade de Évora e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias, 123p. (Tese de Mestrado).
- Brandão, J.M., 2020. Uma proposta temporã de arrendamento das minas de carvão do Porto e Buarcos (c.1820). In: *Uma visão holística da Terra e do Espaço nas suas vertentes naturais e humanas. Homenagem à Professora Celeste Romualdo Gomes*. Editado por I. Abrantes, P.M. Callapez, G.P. Correia, E. Gomes, B. Lopes, F.C. Lopes, E. Pires e A. Rola. Coimbra: Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra (CITEUC), Volume II, pp. 23-45.
- Brandão, J.M., e Vernon, R., 2021. When John Buddle of Newcastle was asked to evaluate some Portuguese coal mines (1818). In: *Memoirs 2021*. Editado por Richard Smith. British Mining, Número 111, pp. 31-49.
- Cardoso, J.L., Dias, R., Lemos de Sousa, M.J., Moreira, P., Rodrigues, C.F.A., e Salgado, A., 2023a. Estratigrafia II – Quadros das Divisões Estratigráficas. Editado por M.J. Lemos de Sousa e Ana Salgado. In: *Thesaurus de Ciências da Terra*. Editado por M.J. Lemos de Sousa, M. Telles Antunes e Ana Salgado. 1.^a edição. Lisboa: Academia das Ciências de Lisboa. 113p.
- Cardoso, J.L., Dias, R., Lemos de Sousa, M.J., Moreira, P., Rodrigues, C.F.A., e Salgado, A., 2023b. Quadros das Divisões Estratigráficas. Vade-Mécum. Editado por M.J. Lemos de Sousa e Ana Salgado. In: *Thesaurus de Ciências da Terra*. Editado por M.J. Lemos de Sousa, M. Telles Antunes e Ana Salgado. 1.^a edição. Lisboa: Academia das Ciências de Lisboa. 35p.
- Correia, P.A. Pereira, 2016. *Contribution to the knowledge of the fossil flora and fauna of the Douro Carboniferous Basin (NW of Portugal)*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, 227p. (Tese de Doutoramento)
- Correia, P., e Murphy, J.B., 2020. Iberian-Appalachian connection is the missing link between Gondwana and Laurasia that confirms a Wegenerian Pangaea configuration. *Scientific Reports* 10(1): 2498.
- Correia, P., Šimůnek, Z., Sá, A.A., e Flores, D., 2017. A new Late Pennsylvanian floral assemblage from the Douro Basin, Portugal. *Geological Journal* 53(6): 2507-2531.
- Costa, M., 2021. *Assinatura Geoquímica das Metantracites da Bacia Carbonífera do Douro*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 140p. (Tese de Mestrado).
- Costa, M., Pinto de Jesus, A., Ferreira da Silva, E., SuárezRuiz, I., Rocha, F., e Flores, D., 2025. Deciphering the Douro Carboniferous Basin (Pejão Coalfield, Portugal): Geochemical, petrological, and mineralogical evidence of depositional, diagenetic, and hydrothermal processes. *International Journal of Coal Geology* 304(1): 104771.
- Costa, M., Moura, H., Pinto de Jesus, A., e Flores, D., 2023. Petrographic, geochemical, and mineralogical characterization of coals from the Douro Carboniferous Basin: São Pedro da Cova and Pejão Coalfields. In: *Joint 74th ICCP and 39th TSOP Meeting*. Patras, Greece, p.20.
- Costa, M., Moura, H., Pinto de Jesus, A., Suárez-Ruiz, I., e Flores, D., 2022. Effects of magmatic fluids in coals of São Pedro da Cova Coalfield, Douro Carboniferous Basin, Portugal: Insights from inorganic geochemistry. *Minerals* 12(2): 275.
- Cunha, D.E. Magalhães Melo, 2013. *Estudo da Contaminação de Solos por Exploração Mineira em S. Pedro da Cova*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociência, Ambiente e Ordenamento do Território, 125p. (Tese de Mestrado).

- Cunha, P.P., Lemos de Sousa, M.J., Pinto de Jesus, A., Rodrigues, C.F., Telles Antunes, M., e Tomás, C.A., 2012. O Carvão em Portugal: Geologia, Petrologia e Geoquímica. In: *O Carvão na Actualidade*. Editado por M.J. Lemos de Sousa, C.F. Rodrigues e M.A.P. Dinis. Volume I: Petrologia, Métodos analíticos, Classificação e Avaliação de Recursos e Reservas, Papel no contexto energético, Carvão em Portugal. Universidade Fernando Pessoa, Academia das Ciências de Lisboa, pp. 309-381 (+2 estampas).
- Diogo, B.S., Nrayan, A., Mansilha, C., Espinha Marques, J., Flores, D., e Antunes, S.C., 2023. Phytotoxicity of coal waste elutriates (Douro Coalfield, North Portugal) in *Lactuca sativa*. *Environmental Science and Pollution Research* 30(49): 107650-107660.
- DR (Diário da República), 2012. Decreto-Lei n.º 60/2012 de 14 de março. Ministério da Economia e do Emprego, *Diário da República* 1.ª Série, 53(março): 1153-1172. (Transpõe a Diretiva n.º 2009/31/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril, e estabelece o regime jurídico da atividade de armazenamento geológico de dióxido de carbono (CO₂)).
- EASAC (European Academies Science Advisory Council), 2013. *Carbon capture and storage in Europe*. German National Academy of Sciences, EASAC policy report 20, 86p. (Manuel Lemos de Sousa: Working Group membership and co-author of the book).
- EU (European Union), 2009. Directiva 2009/31/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009, relativa ao armazenamento geológico de dióxido de carbono. *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. L140/114-L140/135.
- Gomes, A.I.M.A., 2010. *Processos de Injecção de CO₂ em Formações Carboníferas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 116p. (Tese de Mestrado).
- Gomes, R.M.M., 2014. *Recursos Hídricos Subterrâneos: Inventário, Cartografia SIG, Metodologia e Potencialidades. Caso de Estudo: Bacia Hidrográfica da Ribeira de Sá, Sardoura, Castelo de Paiva*. Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2.º Ciclo de Estudos em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território, 98p. (Tese de Mestrado).
- Lemos de Sousa, 1978. O grau de incarbonização (*rang*) dos carvões durienses e as consequências genéticas, geológicas e estruturais que resultam do seu conhecimento. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal* LXIII: 179-365.
- Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1983. General description of the terrestrial Carboniferous Basins in Portugal and history of investigations. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal, Direção Geral de Geologia e Minas, Número 29, pp. 117-126.
- LemosdeSousa,M.J.,Marques,M.,Flores,D.,eRodrigues,C.F.,2010a.Carvõesportugueses:PetrologiaeGeoquímica. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigações e sua História*. Editado por J.M. Coteloneiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha e M. Magalhães Ramalho. Volume I: Geologia Clássica. Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, pp. 291-311. [Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra].
- Lemos de Sousa, M.J., Pinto de Jesus, A., Chaminé, H.I., e Rodrigues, C.F., 2013. Carlos Ribeiro e o Carvão em Portugal. In: *Estudos Arqueológicos de Oeiras – Carlos Ribeiro (1813-1882), Geólogo e Arqueólogo*. Editado por João Luís Cardoso. Câmara Municipal de Oeiras, Centro de Estudos Arqueológicos do Concelho de Oeiras, Academia das Ciências Lisboa, Volume 20, pp. 137-154. [Homenagem da Câmara Municipal de Oeiras e da Academia das Ciências de Lisboa nos 200 anos do seu nascimento].

- Lemos de Sousa, M.J., Rodrigues, C.F. Tato Diogo, M., Pinto de Jesus, A., Mouraz Miranda, A., Dinis, M.A.P., Oliveira, G.M., Chaminé, H.I., Dinis da Gama, C., e Arrais, C.M., 2010b. Carvões portugueses: A revalorização moderna possível de um recurso geológico. O caso-de-estudo da Bacia Carbonífera do Douro. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Editado por J.M. Cotelos Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha e M. Magalhães Ramalho. Volume II: Geologia Clássica. Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, pp. 157-186. [Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra].
- Machado, R.C., 2017. *Geotransversal entre o flanco inverso do Anticlinal de Valongo (Serra de Santa Justa) e Montezelo (Fânzeres): cartografia geológica, estrutura, estratigrafia e metamorfismo*. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 152p. (Tese de Mestrado).
- Mansilha, C., Melo, A., Flores, D., Ribeiro, J., Rocha, J.R., Martins, V., Santos, P., e Espinha Marques, J., 2021. Irrigation with Coal Mining Effluents: Sustainability and Water Quality Considerations (São Pedro da Cova, North Portugal). *Water* 13(16): 2157.
- Milinic, J., Santos, P., Sant'Ovaia, H., Futuro, A., Pereira, C.M., Murton, B.J., Flores, D., e Azenha, M., 2024. Multivariate analysis applied to X-ray fluorescence to assess soil contamination pathways: case studies of mass magnetic susceptibility in soils near abandoned coal and W/Sn mines. *Environmental Geochemistry and Health* 46(202): 1-20.
- Monteiro, S., e Barata, J.A., 1889. *Catalogo descriptivo da secção de minas*. Grupos I e II. Lisboa: Associação Industrial Portuguesa. (Trabalho coordenado sob a direção de José Augusto C. das Neves Cabral).
- Monteiro, M., Santos, P., Marques, J.E., Flores, D., Pereira, C.M., Ribeiro, J.A., e Azenha, M., 2024. Assessment of mobile Mercury concentration in soils of an abandoned coalfield waste pile in Douro region: the Fojo waste pile (Portugal) study case. *Journal of Soils and Sediments* 24(5): 2068-2077.
- Oliveira, A., Flores, D., Calafate, L., e Moreira, J.R., 2014. Os fósseis vegetais e a génese do carvão: uma visita de estudo à Bacia Carbonífera do Douro. *Comunicações Geológicas* 101(Especial III): 1329-1332.
- Pereira, M.G., 2020. Minas do Pejão – MeMóriaS. Couto Mineiro do Pejão 1850-1994. Lisboa: Chiado Books, 750p.
- Pinto de Jesus, A., 2019. Carboniferous intermontane basins of Portugal. In: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*. Editado por C. Quesada e J. T. Oliveira. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Volume 2, pp. 402-408.
- Pinto de Jesus, A., Lemos de Sousa, M.J., Chaminé, H.I., Dias, R., Fonseca, P.E., e Gomes, A., 2010. O Carbonífero em Portugal. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Editado por J.M. Cotelos Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha e M. Magalhães Ramalho. Volume I: Geologia Clássica. Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, pp. 341-355. [Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra].
- Ribeiro, J.P.M., 2011. *Characterization of Geological Materials resulting from Douro Coalfield Coal Mining and Consumption – Potential Environmental Impacts*. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 270p. (Tese de Doutoramento).
- Ribeiro, J., Ferreira da Silva, E., Pinto de Jesus, A., e Flores, D., 2011. Petrographic and geochemical characterization of coal waste piles from Douro Coalfield (NW Portugal). *International Journal of Coal Geology* 87(3-4): 226-236.
- Ribeiro, J., e Flores, D., 2008. Caracterização multidisciplinar da escombreira da Serrinha (Bacia Carbonífera do Douro) – implicações ambientais. In: *V Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, CD-ROM, pp. 79-86.

- Ribeiro, J., Jesus, A.D.P., e Flores, D., 2010. Petrografia e geoquímica orgânica das escombreyras de carvão da Bacia Carbonífera do Douro – implicações ambientais. *e-Terra, Revista Eletrónica de Ciências da Terra, Geosciences On-line Journal* 9(12): 1-4.
- Rodrigues, C., Pinheiro, H., e Lemos de Sousa, M., 2022. Clean Energy Transition Challenge: The Contributions of Geology. In: *Transitioning to Affordable and Clean Energy*. Editado por Edwin C. Constable. Transitioning to sustainability series 7. Basel: MDPI, Switzerland, pp. 47-94.
- Rodrigues, C., Pinheiro, H., e Lemos de Sousa, M.J., 2024. Transição Energética: A Contribuição da Geologia. In: *Energia: Perspetivas a médio e longo prazo*. Editado por Rui Vilela Mendes. Academia das Ciências de Lisboa, Monografias 2 (Parte 2): 29-60.
- Rodrigues, C., Rocha, H., Tasinari, C., e Lemos de Sousa, M.J., 2025. Developments and evolution of CCUS technologies: A review. In: *Carbon Capture and Storage: Law, Policy and Standardization Perspectives*. Editado por Eduardo G. Pereira, Alberto J. Fossa e Thomas L. Muinzer. Springer Nature Sustainable Development Goals Series. Palgrave Macmillan, Cham. Springer Nature, pp. 35-85.
- Rodrigues, S.M.P., 2012. *Microstructural characterization of coals and graphites for industrial applications*. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 270p. (Tese de Doutoramento).
- Rodrigues, S., Flores, D., Suárez-Ruiz, I., e Marques, M., 2014. Evolução sequencial de estruturas resultantes da grafitização de antracites: abordagem petrográfica. *Comunicações Geológicas* 101(Especial II): 845-849.
- Salvador, A., 1994 (reaprovado em 2013). *International Stratigraphic Guide: a Guide to Stratigraphic classification, terminology, and procedure*. International Subcommittee on Stratigraphic Classification of IUGS International Commission on Stratigraphy. 2ª Edição. 214p.
- Santos, P., Espinha Marques, J., Ribeiro, J., Mansilha, C., Melo, A., Fonseca, R., Sant'Ovaia, H., e Flores, D., 2022. Geochemistry of Soils from the Surrounding Area of a Coal Mine Waste Pile Affected by Self-Burning (Northern Portugal). *Minerals* 13(1): 28.
- Santos, P., Ribeiro, J., Espinha Marques, J., e Flores, D., 2023. Environmental and Health Risk Assessment of Soil Adjacent to a Self-Burning Waste Pile an Abandoned Coal Mine in Northern Portugal. *Environments* 10(3): 53.
- Santos, P.C.R., 2013. *Estudo de Suscetibilidade Magnética nos Solos da Extração Mineira de São Pedro da Cova*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, 140p. (Tese de Mestrado).
- Santos, R.M. Gomes, 2008. *Caracterização Hidrogeológica e Hidrogeoquímica da Área Mineira de Germunde, Pejão*. Instituto Superior Técnico, 212p.+anexos. (Tese de Doutoramento).
- Soares, E.R., 2021. *Uma visão do lugar através da ruína. O caso do complexo de Germunde no Couto Mineiro do Pejão*. Universidade do Minho, Escola de Arquitetura, 2 volumes, Volume I (17p.) + Volume II (137p.). (Tese de Mestrado).
- Sousa, A.M.M., 2005. *Sequestração de CO₂ e produção de gás natural na Bacia Carbonífera do Douro*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 87p. (Tese de Mestrado).
- Teixeira, C., 1955. *Notas sobre a Geologia de Portugal: O complexo xisto-grauváquico ante-ordoviciano*. Lisboa: Porto editora, 50p.
- Teixeira, S.R.M., 2012. *Biorremediação de um efluente mineiro por Lemna minor*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 71p. (Tese de Mestrado).
- Thadeu, D., 1965. *Carta Mineira de Portugal na escala de 1/500.000*. Notícia explicativa. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, 46p.

- Vianna, A., 1928. Problema dos carvões nacionais. *Boletim de Minas* 1927: 5-61.
- Vianna, A., 1952. *Carta mineira de Portugal*. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Suplemento 32.
- Vila, T., Ribeiro, J., Garcia, C., Algarra, M., e Flores, D., 2010. *Avaliação do potencial de contaminação por elementos tóxicos e compostos orgânicos na escombreira da Lomba (Bacia Carbonífera do Douro)*. Actas X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa/XVI Semana de Geoquímica, CD, pp. 413-419.
- Wagner, R.H., 2017. The “global” scheme of Pennsylvanian chronostratigraphic units contrasted with the West European and North American regional classifications: discussion of paleogeographic zones/regions and problems of correlation. *Stratigraphy* 14(1-4): 405-423.
- Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2010. The Carboniferous floras of the Iberian Peninsula: A synthesis with geological connotations. *Review of Palaeobotany and Palynology* 162(3): 239-324.
- Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 2016. History and current status of the Pennsylvanian chronostratigraphic units: problems of definition and interregional correlation. *Newsletters on Stratigraphy* 49(2): 281-320.

Investigações geológico-mineiras na região envolvente da mina de carvão de Germunde (NO de Portugal): a subsidência mineira revisitada

HELDER I. CHAMINÉ^{1*}, ANTÓNIO GASPAR², CARLOS M. ARRAIS¹ E CARLOS DINIS DA GAMA³

¹Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto; Departamento de Engenharia Geotécnica, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA). Porto, Portugal

²Geólogo Consultor Independente. Vila Nova de Gaia, Portugal

³Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa e Centro de Recursos Naturais e Ambiente (CERENA). Lisboa, Portugal

* E-mail: hic@isep.ipp.pt

RESUMO

Os autores pretendem visitar as investigações sobre a subsidência mineira na área envolvente da mina de carvão de Germunde (NO de Portugal). O trabalho desenvolvido diz respeito à caracterização e a análise, do ponto de vista topográfico, da informação existente nos domínios geológico, físico e estrutural, com vista a verificar a evolução e o desenvolvimento da subsidência da superfície dos terrenos situados sobre a mina, bem como os eventuais danos a ela associados, quer sobre construções edificadas quer em infraestruturas existentes na área. Com efeito, as características geométricas e geológicas do jazigo de carvão, as propriedades geotécnicas, geomecânicas e hidrogeológicas do maciço rochoso e a vizinhança imediata do rio Douro, constituíram uma ameaça sempre presente à segurança dos trabalhos mineiros. A diminuição da intensidade dos fenómenos de subsidência foi patente a partir de 1994, época em que cessaram as atividades produtivas da mina, possuindo depois disso, uma tendência geral para a respetiva atenuação.

Palavras-chave: Subsidência mineira, Hidrogeomecânica, Mina de Carvão de Germunde, NO de Portugal.

ABSTRACT

This research aims to revisit the study on mining subsidence in the Germunde coal mine (NW Portugal) and surrounding areas. This approach involves the characterisation and analysis, from a topographical point of view, of the existing information in the geological, physical and structural domains to verify the evolution and development of subsidence of the surface of the ground set over the mine, as well as, any associated damage, either on built constructions or on existing infrastructures in the region. In fact, the geometrical and geological characteristics of the coal

deposit, the geotechnical, geomechanical, and hydrogeological properties of the rock mass, and the immediate vicinity of the Douro river always constituted a threat to the safety of the mining works. The decrease in the intensity of the subsidence phenomenon was evident in 1994, when the mine's production operations came to a standstill, with a general trend to reduce after that.

Key-words: Mining subsidence, Hydrogeomechanics, Germunde coal mine, NW Portugal.

1. INTRODUÇÃO

A subsidência mineira induzida pelo desenvolvimento de aberturas subterrâneas, comumente realizadas durante a exploração mineira, tem merecido a atenção da comunidade geomineira internacional, tanto pelos danos que tal fenómeno origina à superfície, como pela necessidade de garantir a máxima segurança aos trabalhos mineiros subterrâneos (p. ex., Briggs 1929; Farinas de Almeida 1944; Wardell 1954, 1969; Parker 1973/1974; NCB 1975; Bell 1975; Peng 1978, 1992; Kratzsch 1983; IGME 1984; Pérez et al. 1986; ERL 1987; Whittaker e Reddish 1989; Bahuguna et al. 1991; Singh 1991; Wagner e Schümann 1991; Kenny 1992; Singh e Dhar 1997; Géochronique 1998; Besson et al. 1999; Bell et al. 2001; Ulusay et al. 2001; Dinis da Gama et al. 2002; Can et al. 2011; Marschalko et al. 2012, 2013; Swift 2014; Blachowski e Milczarek 2014; Sanmiquel et al. 2018; Guney e Gul 2019; Marino et al. 2020; Białek et al. 2020; Cui et al. 2020; Liu et al. 2022; Cai et al. 2023; Machowski et al. 2024; Zhao et al. 2025). No caso de uma mina de carvão, a subsidência mineira consiste, essencialmente, num aluimento até à superfície, do maciço rochoso afetado pelos desmontes das diversas camadas de carvão (Figura 1). A subsidência mineira

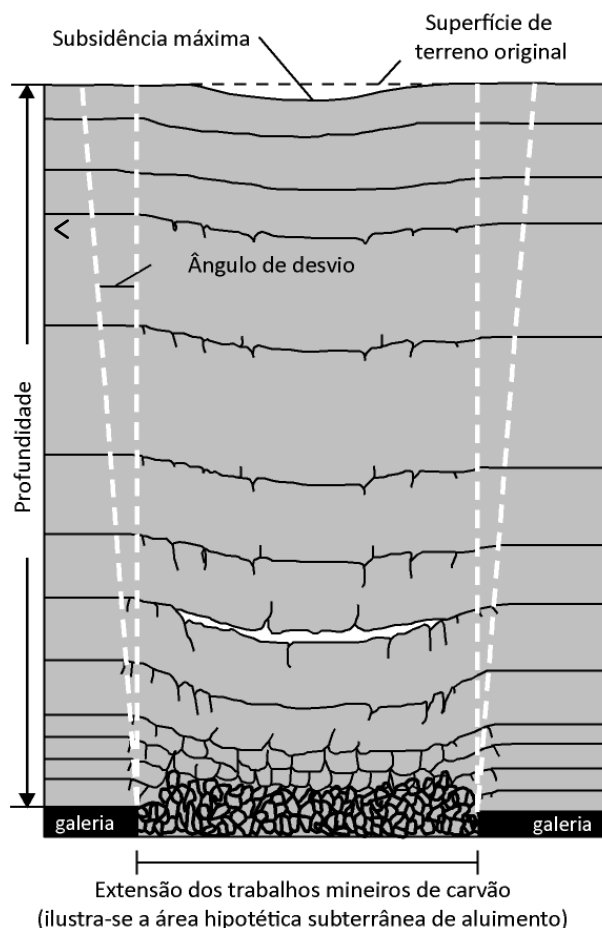


Figura 1 – Perfil esquemático de subsidência provocado por uma exploração mineira de carvão (adaptado de Korose et al. 2009).

depende, por isso, das características geológicas, tectônicas e hidrogeológicas do maciço rochoso, do comportamento geomecânico dos materiais geológicos, da geometria e da forma das aberturas subterrâneas da exploração, bem como do método de desmonte (p. ex., Bell 1975; Dunrud 1976; Peng 1978, 1992; Kratzsch 1983; Singh 1991; Wagner e Schumann 1991; Dinis da Gama e Dutra 1994; Dinis da Gama e Curi 1997).

No estudo da subsidência mineira e das suas consequências mecânicas nos maciços rochosos, a monitorização topográfica e a cartografia geológico-estrutural são de grande utilidade para a determinação das possíveis causas que presidem à localização das descontinuidades geológicas no terreno (especialmente, zonas de fraqueza crustal, falhas profundas, zonas de cisalhamento, limites geológicos, etc.). Os deslocamentos relativos, que ocorrem ao longo das referidas descontinuidades, serão necessariamente afetados por todo e qualquer plano de anisotropia previamente existente (p. ex., Wardell 1971; Dunrud 1976; Brown 1991; Chaminé e Silva 1993; Dinis da Gama e Dutra 1994; Dinis da Gama e Curi 1997; Swift 2014), seja um contacto geológico entre formações de resistência geomecânica contrastante ou uma foliação correspondente a uma anisotropia planar (p. ex., estratificação, clivagem, xistosidade, falha, fratura ou diáclase). Estes estudos deverão ser, sempre que possível, complementados com estudos de cartografia aplicada, bem como com investigações hidrogeológicas, geotécnicas e geomecânicas (p. ex., Chaminé e Gaspar 1995; Brady e Brown 2004; Chaminé et al. 2015; Chaminé e Fernandes 2023).

As primeiras consequências verificadas à superfície da atividade mineira desenvolvida na área de Germunde foram inequivocamente observadas a partir de 1940 (ECD 1992; Dinis da Gama 2000). Anos mais tarde, a intensidade do aluimento dos terrenos indicava já a ocorrência de subsidências de ordem métrica, com resultados extremamente gravosos. Para controlar a subsidência geral do maciço desta zona, procedeu-se, entre outros, a uma monitorização topográfica de pormenor, a estudos de geologia de superfície e de geomecânica mineira, nomeadamente para delimitar as zonas superficiais afetadas e para proteger os próprios trabalhos mineiros contra possíveis perigos resultantes de afluxos de água à mina.

Os estudos geológico-mineiros desenvolvidos na região envolvente de Germunde-Arda permitiram uma melhor compreensão do mecanismo da subsidência mineira e circunscrever as manifestações de subsidência superficial na zona da mina de carvão de Germunde (ECD 1992, 1995; Dutra 1993). Estes estudos evidenciaram, entre outros aspetos, um evidente controlo litológico e geológico-estrutural das descontinuidades e da fraturação regional à mega e mesoescala (p. ex., Chaminé 1992; Chaminé e Silva 1993, 1997; Gaspar et al. 1994a), um contraste hidrogeomecânico na compartimentação do maciço rochoso (Chaminé et al. 2004), e levaram ao desenvolvimento de um modelo computacional do fenómeno da subsidência com base em medições topográficas e instrumentais minuciosas (ECD 1992; Dutra 1993) e, por fim, à avaliação geoambiental da zona degradada (Gaspar et al. 1994a, 1995b) e à apresentação de uma estratégia

para a aplicação de medidas de carácter técnico-ambiental e socioeconómicas minimizadoras do impacto criado pela subsidência superficial da área envolvente de Germunde (ECD 1992).

2. ESTUDOS GEOLÓGICO-MINEIROS APLICADOS NA SUBSIDÊNCIA MINEIRA

“The literature is important as a background, revealing what sort of things to look for, but basically you need to get out and examine your own mine to learn about surface subsidence” (Parker 1973/1974)

Desde meados do século XIX que, em várias áreas mineiras de carvão da América do Norte e da Europa do Norte e Central, há relatos de movimentos de terrenos a várias escalas (p. ex., Briggs 1929; Peng 1978, 1992; Kratzsch 1983; Whittaker e Reddish 1989; Singh 1991; Blachowski e Milczarek 2014). Tais movimentações têm provocado danos consideráveis em edifícios, vias de comunicação, redes de abastecimento de água e eletricidade, terrenos agrícolas e nascentes de água. Estes factos levaram os proprietários a exigir indemnizações e mesmo a apresentar processos indemnizatórios em tribunal. Para evitar situações injustificadas, muitos dos Serviços Geológicos estatais internacionais efetuaram, desde o dealbar do século XX, numerosos estudos técnico-científicos sobre subsidência mineira ou aluimentos de terrenos (consultar, por exemplo, Trent et al. 1988; Gray 1990). Da experiência adquirida por estas instituições acerca do desenvolvimento destes fenómenos surgiu, então, uma especialidade — Engenharia da Subsidência Mineira — que, por exemplo na Alemanha, apareceu no início da década de trinta do século passado (cf. Kratzsch 1983). Hoje em dia, cabe essencialmente a este domínio do conhecimento o seguinte (p. ex., NCB 1975; Kratzsch 1983; ERL 1987; Whittaker e Reddish 1989; Dinis da Gama e Curi 1997; Géochronique 1998; Besson et al. 1999; Estrella et al. 2000; Bell et al. 2000, 2001; Ulusay et al. 2001; Bauer 2006, 2008; Korose et al. 2009; López-Gayarre et al. 2010; Sütő 2010; Thompson et al. 2011; Swift 2014): (i) prever os movimentos dos terrenos na área dos trabalhos mineiros; (ii) avaliar os efeitos dos aluimentos nas estruturas dos edifícios, poços das minas, vias de comunicação, terrenos agrícolas, etc.; (iii) minimizar os danos provocados pela subsidência mineira, reforçando, por exemplo, as estruturas das construções.

Num sentido mais lato, considera-se como *aluimento* ou *subsidência* de um terreno a descida deste, com tendência para o preenchimento dos vazios criados por escavações abertas no seu interior. No caso de uma mina de carvão, a *subsidência mineira* consiste, essencialmente, num aluimento até à superfície dos terrenos afetados pelos desmontes das camadas de carvão. No entanto, em termos gerais, podemos distinguir dois tipos de aluimentos (Mello Mendes 1985): *aluimentos internos*, que apenas afetam uma altura limitada do maciço sobrejacente às escavações mineiras; e *aluimentos de superfície* (ou subsidência mineira), em que os fenómenos

atingem a superfície do terreno, deformando-a de forma considerável.

De uma forma simples podemos dizer que as primeiras manifestações da subsidência mineira iniciam com a convergência do maciço envolvente das cavidades subterrâneas no sentido do preenchimento do vazio; segue-se a fraturação do contorno destas, caso haja condições para tal, e, por fim, dar-se-ão aluimentos de superfície, ou seja, a descida de todo-o-terreno sobrejacente aos vazios criados pela exploração.

A subsidência quanto ao tipo de deformação que provoca na superfície do terreno, pode ser de dois tipos (Brady e Brown 2004):

(i) *subsidência contínua*: caracterizada por um perfil suave de subsidência. Este tipo de subsidência caracteriza-se por não apresentar movimentos relativos consideráveis nem deslizamentos ao longo de superfícies de fraqueza, e está usualmente associado com a extração de corpos mineralizados de pequena espessura, sub-horizontais, cujo estrato sobrejacente possua baixa resistência e comportamento não-frágil. É muito comum em minas de carvão, mas também se encontra associado ao processo de extração de minerais metálicos e depósitos de evaporitos;

(ii) *subsidência descontínua*: caracterizada por ocorrerem deslocamentos de grandes superfícies sobre áreas limitadas da superfície do terreno, formando degraus na mesma. Este tipo de subsidência pode estar associado ao método de exploração, envolvendo vários mecanismos de rotura, os quais poderão desenvolver-se de forma súbita ou progressiva, e manifestar-se a várias escalas. Encontram-se descritas diferentes formas de subsidência descontínua, como por exemplo, cavidades em coroa, desabamentos em chaminé, subsidência de bloco e cavidades de dissolução.

Os movimentos de terrenos originados pelas explorações mineiras subterrâneas podem, pois, constituir uma fonte de problemas de extrema gravidade. A experiência mostra que as repercussões à superfície variam bastante, de acordo com as condições de exploração e características geológicas e hidrogeomecânicas do maciço rochoso. Para minimizar e prever os efeitos das explorações mineiras à superfície, é de extrema importância a recolha de dados concretos sobre a influência da exploração em pontos singulares à superfície, bem como conhecer as regras corretas para a construção de edifícios, de modo que estes se adaptem às condições induzidas por novas explorações mineiras (p. ex., NCB 1975; ERL 1987; Besson et al. 1999; Bell et al. 2001) (Figura 2).

A Figura 2 ilustra, portanto, o movimento e a deformação de um edifício antes, durante e depois da passagem dos trabalhos mineiros por baixo deste. Assim, numa primeira fase, o edifício situa-se à frente da extração, na zona de máxima deformação de tração e de máxima curvatura convexa. Numa segunda fase, pouco depois da passagem da frente de extração, a estrutura atinge a sua inclinação máxima e desloca-se no sentido da área de exploração. Por último, a estrutura apresenta uma curvatura côncava e é comprimida pelo terreno. Um testemunho bem característico da subsidência em construções é a ocorrência de fendas de tração. Num regime compressivo, as fendas são sub-horizontais, e nas paredes que têm zonas de fraqueza instalam-se na diagonal a partir de um canto de uma janela ou porta, acompanhando sempre a zona

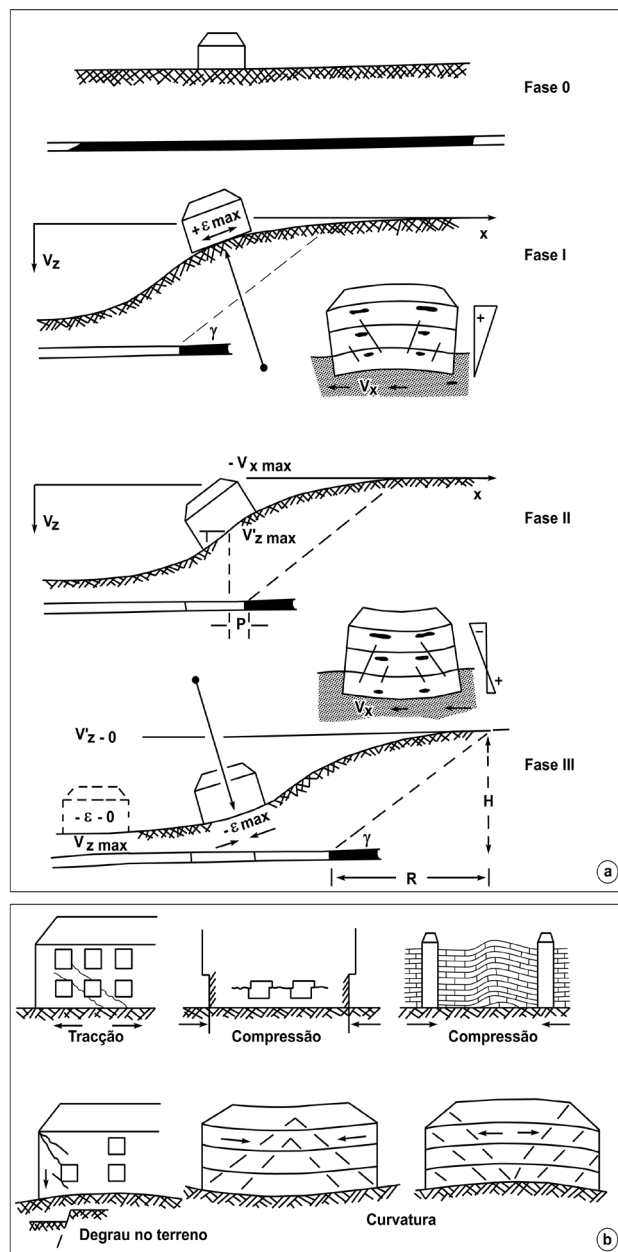


Figura 2 – Efeitos característicos provocados pela subsidência mineira (adaptado de Kratzsch 1983): a) Movimento e deformação de uma construção aquando da passagem subterrânea de trabalhos mineiros (adaptado de Kratzsch 1983 e de Pérez et al. 1986); b) Tipos de fraturas desenvolvidas nas paredes de uma construção, sujeitas a distintos comportamentos reológicos dos materiais, provocados pela subsidência mineira.

de menor resistência. Convém destacar ainda a ocorrência de fendas de tração conjugadas (Kratzsch 1983; Pérez et al. 1986). Por outro lado, a área afetada da superfície do terreno não é necessariamente a zona sobrejacente à lavra subterrânea, mas poderá ser, esquematicamente, relacionada com um “tronco de cone” invertido que se alarga do interior para a superfície (Dutra 1993; Dinis da Gama e Dutra 1994; ECD 1995).

Os métodos de cálculo da subsidência mineira utilizados referem-se, em regra, aos seguintes casos (p. ex., IGME 1984; Pérez et al. 1986; Bahuguna et al. 1991; Dinis da Gama e Dutra 1994; Dinis da Gama e Curi 1997; Rodríguez e Toraño 2000; Lokhande et al. 2006): (i) depósitos estratificados (caso das explorações de carvão); (ii) explorações mineiras em estruturas geológicas complexas; (iii) zonas onde a dimensão e a profundidade dos trabalhos mineiros são apreciáveis em comparação com a possança das camadas. Estes métodos consideram o movimento de pontos do maciço no espaço, apresentando uma componente vertical e duas horizontais. Apenas a componente vertical do ponto em movimento, designada subsidência, pode ser medida diretamente, enquanto que as componentes horizontais são calculadas trigonometricamente, recorrendo-se, por isso, a métodos topográficos.

3. BREVE HISTORIAL DA SUBSIDÊNCIA MINEIRA NA REGIÃO DE GERMUNDE

A exploração dos carvões durienses teve início em 1795 (Ribeiro 1858), sendo conhecidas várias minas ao longo da Bacia Carbonífera do Douro (pormenores em Lemos de Sousa 1973, 1977, 1978a,b, 1984a,b; Lemos de Sousa et al. 2013), das quais as mais importantes estão agrupadas no Couto Mineiro de São Pedro da Cova (lavra subterrânea terminada em 1972), e no Couto Mineiro do Pejão, onde a última mina com lavra subterrânea (mina de Germunde) encerrou em 1994.

Os primeiros trabalhos de prospeção e pesquisa realizados na área do Pejão iniciaram em 1884, levando à criação da ECD – Empresa Carbonífera do Douro, Lda., em 1917, depois transformada em Sociedade Anónima, em maio de 1963. Em 1979, o IPE – Instituto das Participações do Estado, EP adquiriu a totalidade do seu capital, tendo-o cedido à Ferrominas, EP em 1984. Posteriormente, o capital social da ECD passou a ser maioritariamente detido (99,8%) pela EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA. Durante a Segunda Guerra Mundial, e nos anos que se lhe sucederam, a ECD atravessou um período de grande desenvolvimento, com duas minas em exploração. A produção de carvão foi vital para o País a, tendo contribuído largamente para o funcionamento regular de Fábricas têxteis e de cimento, Centrais Termoelétricas do Freixo (Porto), Reunidas (Lisboa) e Cachofarra (Setúbal) e muitas outras indústrias. A circulação de comboios ficou a dever-se, em grande parte, à utilização de carvão aglomerado, na época conhecido por “briquetes Pejão” (Dinis da Gama 2000).

A ECD deteve dez concessões mineiras localizadas na Bacia Carbonífera do Douro, sendo que as mais importantes constituíam o Couto Mineiro do Pejão, compreendendo uma área superior a 500 hectar envolvendo as freguesias de Pedorido, Raiva e S. Pedro do Paraíso, todas no concelho de Castelo de Paiva. O número máximo de trabalhadores alcançou os 1112 no início de 1986, tendo os efetivos da ECD diminuído paulatinamente desde então, mercê de um conjunto de ações de racionalização que foram implementadas. Dadas as características económicas da extração do carvão e tendo em conta que a Central da Tapada do Outeiro deixaria, a partir de 1995, de utilizar carvão, definiram-se as condições de manutenção da exploração mineira e a gradual desmobilização da mina do Pejão, conforme a Deliberação do Conselho de Ministros de 4 de outubro de 1990, que impôs o seu encerramento em 1995.

As datas-chave sobre a etapa final da operação da mina, adiante referidas, possuem uma importância considerável para um correto enquadramento dos fenómenos de subsidência verificados na região de Germunde, a saber (Dinis da Gama 2000): (i) paralisação da abertura de novas galerias, julho de 1994; (ii) encerramento da mina de Germunde, dezembro de 1994; (iii) inundação do Poço Germunde II, junho de 1996.

A exploração do carvão na área do Pejão, como já se mencionou, teve início por volta do ano 1900. A Companhia Portuguesa de Carvões, que detinha então a concessão mineira, extraiu

aquela matéria-prima na denominada mina de Rodelo (nível N+185 m), por meio de trabalhos subterrâneos com acesso em flanco de encosta e aplicação de um método de desmonte ascendente de corte e enchimento. Estes trabalhos foram de importância limitada, tanto em volume como em duração. Posteriormente, em 1945/1946, as atividades de exploração foram retomadas, já pela ECD – Empresa Carbonífera do Douro, SARL, em cotas inferiores àquela (níveis N+135 m, N+85 m e N+35 m), mantendo-se, no entanto, o anterior método de desmonte e o tipo de meios de acesso ao jazigo. Só em 1961 se procedeu à abertura do 1.º Piso totalmente subterrâneo (N-15 m), seguindo-se-lhe, com continuidade, os pisos seguintes. Em 1966, o método de desmonte utilizado na mina de Germunde, com enchimento, atrás referido, foi substituído pelo método descendente por abatimento a partir de chaminés inclinadas, sem enchimento, que prevaleceu até ao fim da atividade mineira no jazigo (Machado 1970).

Em termos de consequências superficiais da exploração mineira subterrânea, há que considerar, assim, dois períodos distintos: entre 1900 e 1966 e após este ano. No primeiro período, a superfície foi pouco ou nada afetada, salvo em zonas muito localizadas onde os trabalhos mineiros a intersectavam. Depois de 1966, uma vez que deixou de haver qualquer preenchimento dos vazios criados pela lavra, ocorreu o desabamento controlado dos tetos das áreas de extração de carvão, com as respetivas desarticulação e compactação posterior do material desabado, passando a ser o principal responsável pela instabilização na vizinhança dos vazios e pela sua propagação até à superfície, onde as suas consequências começaram a ser assinaladas. Com efeito, considerando as toneladas de carvão extraídas por abatimento entre o 1.º Piso (1966) e o 7.º Piso (avaliação feita até fim de 1990), num total superior a 6.350.000 toneladas brutas, e os correspondentes volumes de vazios criados, perfazendo cerca de 4.500.000 m³, facilmente se conclui que os efeitos à superfície teriam de ocorrer mais cedo ou mais tarde (Dinis da Gama 2000).

Dada a complexidade das estruturas geológicas em presença e a multiplicidade de parâmetros geomecânicos em jogo, os fenómenos de subsidência não se manifestavam nem com regularidade temporal nem com homogeneidade espacial. Daí as dificuldades em detetar, em cada instante, as origens dos focos causadores das perturbações na superfície e em prever a evolução das situações. Assim, no dealbar de 1990, foram desenvolvidas investigações sistemáticas no âmbito de projetos multidisciplinares relativos ao estudo da subsidência mineira. Estes projetos foram patrocinados pela CECA – Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (convenções N.º 7220/AD/761 e N.º 7220/AF/001, vide ECD 1992, 1995) e levados a cabo pela então empresa concessionária da mina de carvão de Germunde (Empresa Carbonífera do Douro, SA).

Entre a informação constante dos arquivos da ECD e publicações (p. ex., ECD 1992, 1995; Chaminé 1992; Chaminé e Silva 1993; Gaspar et al. 1994a,b; Dinis da Gama 2000; Chaminé et al. 2004 e referências citadas nos trabalhos anteriores), considera-se pertinente, para a análise da

evolução da subsidência mineira, o seguinte:

(i) A instalação de sucessivas fiadas de marcos trigonométricos de apoio aos levantamentos topográficos, incluídos na área da mina para evidenciar abaxamentos de cota, entre o período de 1990 a 1998; para além do aluimento geral do terreno, evidenciado por estas diminuições de cota, a superfície apresentou as denominadas “quebras” ou “fraturas de aluimento” (termos da linguagem geológico-mineira local correspondentes a grandes superfícies de fraturação induzidas pela exploração, mais ou menos regulares, com ou sem rejeito relativo sobre zonas limitadas). As “quebras”, com expressão cartográfica, nos terrenos do Carbonífero (QC1, QC2 e QC3) começaram a evidenciar-se após a exploração das 1.^a, 2.^a e 3.^a camadas de carvão. De 1970, ano em que terminou praticamente a exploração da 1.^a camada no 3.^o Piso (as camadas 2.^a e 3.^a tinham, entretanto, desaparecido no nível N+35 m, sendo a sua exploração, a partir daí, ocasional e em locais isolados), até 1985/1986, as mesmas “quebras” mantiveram-se sensivelmente estacionárias, só se reativando mais tarde, quando a exploração da mina já era bastante profunda, abaixo do 6.^o Piso na 4.^a camada. Por seu lado, as grandes “quebras” (QS1 e QS2), do segundo grupo, evidenciaram-se à superfície por volta de 1970, com a exploração ao nível do 3.^o Piso da mina, antes do início da exploração mais intensiva da 4.^a camada de carvão, mais próxima do Ordovícico e situada abaixo daquele piso. Quanto à “quebra Q.V.”, localmente designada por “Quebra Vertical”, com extensa continuidade cartográfica no terreno, começou a evidenciar-se à superfície por volta de 1972/1973, quando a exploração mineira operava no 4.^o Piso. Entre os perfis da mina P8 e P14, esta descontinuidade geomecânica revelou uma subsidência progressiva notória do terreno a SO, tendo chegado a acusar rejeitos de 0,5 m. Para SO da formação carbonífera, para além do contacto com os xistos do Precâmbrico/Câmbrico Inferior, materializado pela ocorrência da “Brecha de Base”, a superfície do terreno sempre revelou estabilidade, com poucos ou nenhuns danos nas edificações aí situadas;

(ii) No referente aos danos causados em construções, os registos de reclamações por parte dos proprietários, as reparações feitas pela ECD em habitações e as indemnizações totais pagas por inabitabilidade de casas levaram à definição das seguintes zonas mais intensamente atingidas: Zona A – junto ao contacto do muro da formação carbonífera, no limite NE da povoação da Póvoa; Zona B – no lugar da mina da Pedra, a teto da formação carbonífera; Zona C – no lugar do Alto do Picão, igualmente a teto da formação anterior; Zona D – no sítio da Quelha, ainda com a mesma situação geológica. Até cerca de 1970, as reclamações, reparações e indemnizações restringiram-se a apenas algumas habitações, todas incluídas na Zona A. No decénio 1971/1980, a par de um caso isolado de ruína (habitação n.º 76), verificado naquela zona, começaram a verificar-se danos nas Zonas B, C e D. No decénio 1981/1990, as ruínas intensificaram-se em todas as zonas referidas. As situações mais gravosas verificadas em habitações ocorreram sobre ou na proximidade da QV. Quanto a ruínas em edificações, há a notar que, dentro das zonas referidas, existiam algumas habitações isoladas sem danos aparentes;

(iii) Para além dos danos em habitações, é de referir a ocorrência de outros tipos de prejuízos decorrentes dos fenómenos de subsidência, nomeadamente em caminhos, condutas de abastecimento de água, captações de água, etc.. A título de exemplo, refere-se as condutas de água, sendo que a situação merecedora de maior atenção ocorreu na conduta elevatória de Pedorido, sensivelmente normal ao maior desenvolvimento das formações carboníferas e que abastece um reservatório geral situado no local mais elevado de Serrinha. Esta conduta era constituída por tubagem de ferro fundido com um diâmetro de 150 mm, apresentando uma grande rigidez não compatível com os assentamentos diferenciais do terreno ao longo do seu desenvolvimento. A análise dos dados referentes aos pontos de rotura sistemática desta conduta permite inferir que os seus troços mais sensíveis se localizavam nas proximidades da QV e na zona de contacto com a “Brecha de Base”, respetivamente a teto e a muro dos terrenos carboníferos. Para evitar essas roturas, realizaram-se estudos que apontaram para a substituição dos troços em questão por outros de tubagem de PVC de alta resistência, um material mais flexível e com as características hidráulicas adequadas. A instalação das condutas far-se-ia em “cama livre”, convenientemente amarradas, com proteção por meias manilhas de betão, de forma a melhorar as condições de manutenção e exploração face aos movimentos do terreno.

Os caminhos também refletiam, ao longo dos respetivos perfis, os assentamentos diferenciais que no terreno se iam verificando. Em geral, a correção das situações a que estes fenómenos davam lugar era fácil e não envolvia custos significativos.

No que respeita à influência da subsidência mineira nos caudais de numerosas captações de água existentes na região, a informação disponível era escassa e pouco rigorosa. Dum modo geral, estas captações eram minas de água tradicionais com apenas algumas dezenas de metros de extensão, abertas no flanco da encosta e dirigidas para descontinuidades ou zonas que se apresentavam como mais favoráveis à circulação da água subsuperficial. Os caudais destas captações eram fortemente influenciados pelas precipitações locais, com respostas quase imediatas, denotando diminutas áreas de influência e recarga. Nestas condições, as alterações de permeabilidade do terreno, devidas aos fenómenos de subsidência, facilmente influenciavam os caudais produzidos, mas não seriam, de um modo geral, as únicas causas das quebras de produção verificadas nas captações. De resto, os prejuízos ocorridos nestas não são, no seu conjunto, muito significativos, tendo sido compensados pela ECD através de indemnizações aos respetivos proprietários.

4. O CONTROLO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA SUBSIDÊNCIA MINEIRA

Como já foi mencionado, a exploração de minas de carvão provoca diversos tipos de efeitos na superfície dos terrenos, que se manifestam quer na área sobrejacente à área de exploração, quer nas áreas vizinhas (p. ex., Parker 1973/1974; NCB 1975; Dunrud 1976; Kratzsch 1983; IGME 1984; Géochronique 1998; Besson et al. 1999; Bell et al. 2001; Ulusay et al. 2001; Donnelly e Rees 2001; Donnelly 2006, 2009; Donnelly et al. 2008; Oh e Lee 2011; Lee et al. 2012, 2013; Swift 2014). O controlo da subsidência geral do maciço de Germunde era fundamental não só para a conveniente delimitação das zonas superficiais afetadas, como para a proteção dos próprios trabalhos mineiros contra possíveis perigos resultantes de afluxos de água à mina. Para isso recorreu-se à monitorização do comportamento das cavidades subterrâneas no interior, registando as suas modificações de forma geométrica ao longo do tempo, e ainda à superfície, através do acompanhamento dos deslocamentos verticais (e suas componentes horizontais) provocados como consequência do desenvolvimento dos trabalhos executados em profundidade. O primeiro caso designa-se por medições de convergência das cavidades e o segundo por registo de subsidências, os quais constituem preciosos indicadores da patologia das escavações subterrâneas mineiras (Dinis da Gama 1991; ECD 1992; Chaminé e Silva 1993, 1997; Chaminé et al. 2004).

Em termos de geologia regional, considera-se que a Bacia Carbonífera do Douro constitui o mais extenso afloramento de Carbonífero continental existente em Portugal, estendendo-se desde São Pedro Fins (Este do Porto) até Janarde (Este de Arouca), ao longo de uma estreita faixa, de orientação geral NO-SE, com cerca de 50 km de comprimento e raramente ultrapassando os 500 m de largura (p. ex., Lemos de Sousa 1973, 1977, 1978b, 1984a,b; Pinto de Jesus 1987, 2003; Pinto de Jesus et al. 2010; Cunha et al. 2012). O limite SO corresponde a uma discordância angular com inconformidade dos depósitos do muro da Bacia do Douro sobre os do Complexo xisto-grauváquico. A NE, os corpos sedimentares do teto da Bacia do Douro são truncados por uma falha inversa, a qual faz com que as camadas do Paleozoico Inferior, estruturadas no flanco inverso do Anticlinal de Valongo, cavalguem as camadas carboníferas. No setor de São Pedro da Cova, a estrutura tectónica é bastante complexa e a ramificação dos acidentes tectónicos provocou, por escamização, a formação da designada bacia oriental (Lemos de Sousa 1973, 1977, 1978a,b, 1984a,b). Em provável relação com o mesmo tipo de tectónica, no setor de São Pedro da Cova e no setor de Germunde, afloram, no interior da faixa carbonífera, terrenos do Paleozoico Inferior (nomeadamente, quartzitos, quartzitos xistoides e xistos ardosíferos do Ordovícico), os quais se encontram geralmente delimitados, por contactos estratigráficos e por contactos tectónicos, respetivamente, a NE e a SO (Pinto de Jesus 1987, 2003). Apenas numa parte da Bacia do Douro (Ermesinde-Paraíso), designada por Bacia Carbonífera do Douro (Lemos de Sousa 1973, 1977, 1978b, 1984a,b), foram reconhecidas e exploradas camadas de carvão, as

quais foram estudadas em pormenor e caracterizadas por Lemos de Sousa (1973, 1978a,b) como sendo metantracites. A evolução tectonossedimentar e a estrutura atual da Bacia do Douro são de sobremaneira complexas (Domingos et al. 1983; Pinto de Jesus 1987, 2003; Pinto de Jesus e Lemos de Sousa 1998; Pinto de Jesus et al. 2010; Lemos de Sousa et al. 2013). A Bacia Carbonífera do Douro resultou da sedimentação detrítica continental e intramontanhosa numa bacia gerada por um “pull-apart” esquerdo (Pinto de Jesus 2003, 2019). Tal como já referido, a Sudoeste, o muro da Bacia do Douro encontra-se delimitado pelo Complexo xisto-grauváquico através de uma descontinuidade sedimentar por inconformidade. A NE, o teto da Bacia do Douro está truncado por um acidente tectónico cavalgante com componente desligante esquerda (φ_2 ou ω_2). Este cavalgamento coloca os estratos do Paleozoico Inferior do flanco inverso do Anticlinal de Valongo sobre os estratos carboníferos da Bacia do Douro. Entre São Pedro da Cova e Folgoso existe um cavalgamento intracarbonífero (φ_1 ou ω_4), que truncou e transportou a parte oriental da Bacia do Douro (e parte do substrato da mesma), fazendo com que esta escama se encontre, atualmente, a cavalgar a faixa ocidental da Bacia do Douro (Wagner et al. 1984; Pinto de Jesus 1987, 2019). Para uma visão pormenorizada dos quadros geológico, estratigráfico, paleontológico, tectónico e das reservas deve consultar, pelo menos, Lemos de Sousa (1973, 1977, 1978b, 1983, 1984a,b); Lemos de Sousa e Oliveira (1983); Lemos de Sousa e Wagner (1985); Pinto de Jesus (1987, 2003); Freire (1989); Pinto de Jesus e Gaspar (1997); Pinto de Jesus e Lemos de Sousa (1998); Pinto de Jesus et al. (2010); Cunha et al. (2012); Pinto de Jesus (2019).

Os trabalhos de geologia de superfície efetuados na região de Germunde–Arda, dirigidos para a investigação da subsidência mineira, consistiram essencialmente numa cartografia geológico-estrutural pormenorizada ao longo dos diversos perfis topográficos implantados no terreno para medir as subsidências, bem como para analisar o padrão da fraturação regional e local, apoiada por trabalhos de geologia de terreno e de fotointerpretação (pormenores em Chaminé 1992). Tais alinhamentos de marcos topográficos (Figuras 3 e 4), transversais e longitudinais à bacia carbonífera, de controlo das subsidências permitiram registar com rigor a evolução do fenómeno no espaço e no tempo (ECD 1992).

A informação recolhida permitiu destacar alguns dados geológicos com certa relevância para eventuais correlações entre a geologia de superfície e a posição no terreno das descontinuidades provocadas pela subsidência (ECD 1992; Chaminé 1992; Chaminé e Silva 1993, 1997; Dutra 1993; Gaspar et al. 1994a,b, 1995a,b). Com efeito, estando a origem de grande parte das descontinuidades perfeitamente justificada pela exploração da mina de Germunde, restava, contudo, investigar o motivo que preside à sua localização no terreno. Ora, tudo aponta para um controlo geológico-estrutural à qual a localização das descontinuidades à superfície estará sujeita, podendo esse controlo ser referido em termos de uma adaptação destas a superfícies de rotura preferencial já existentes (Chaminé e Silva 1993, 1997).

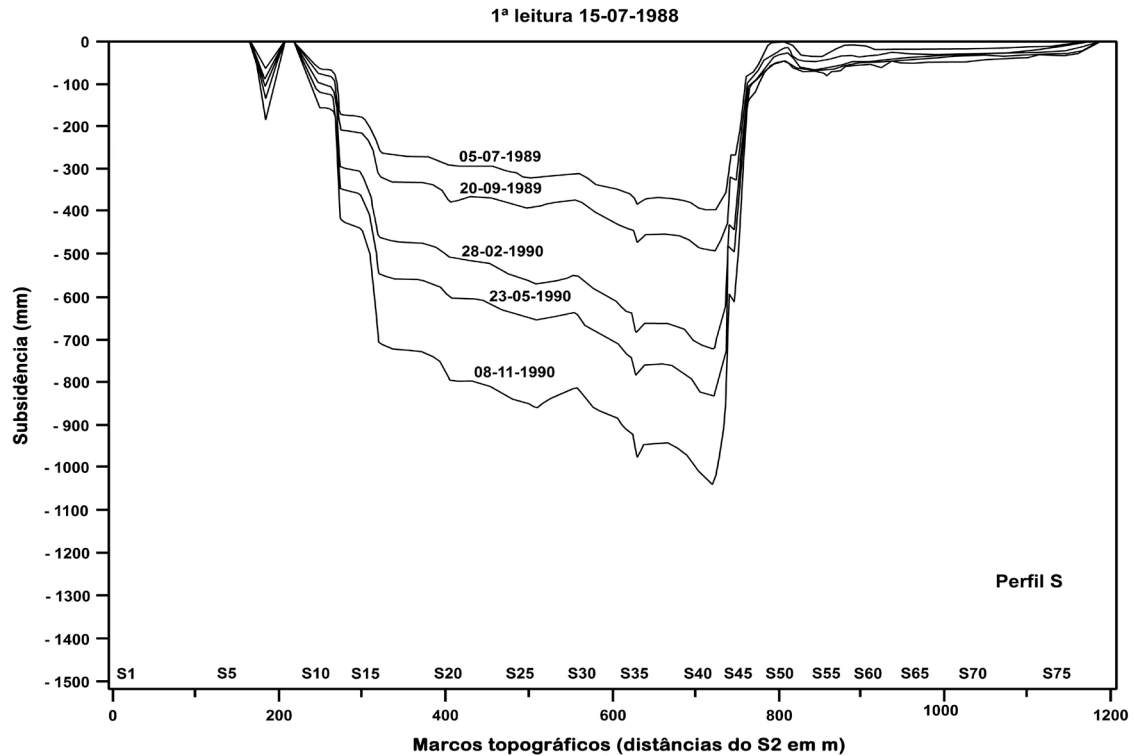


Figura 3 – Exemplo do registo da subsidência ao longo do perfil de medições (perfil S), na região de Germunde (Arquivos ECD; Adaptado de ECD 1992).

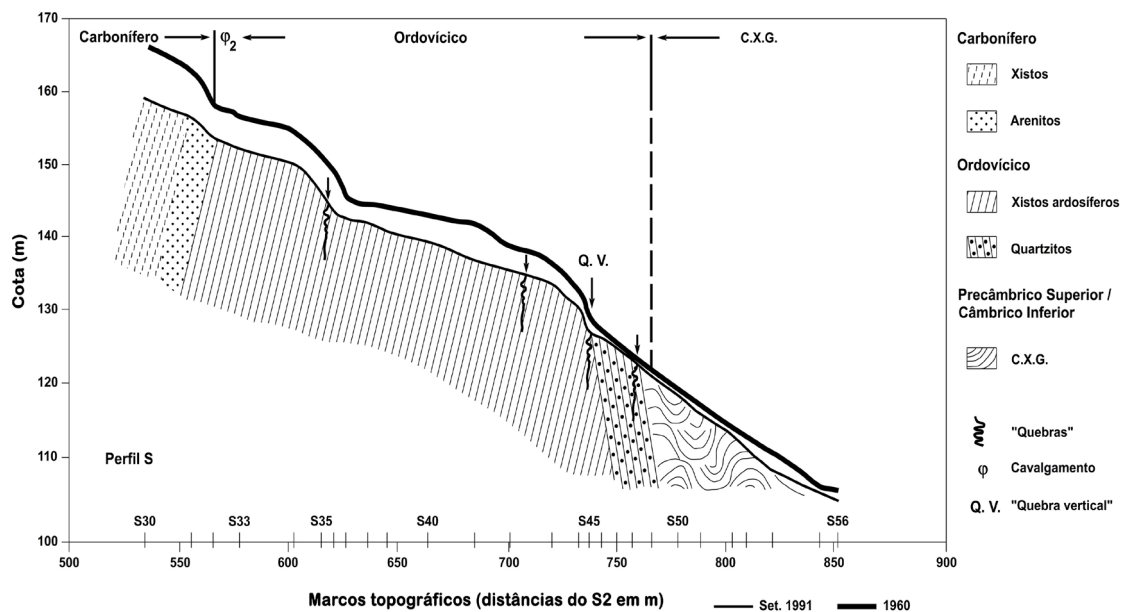


Figura 4 – Corte topográfico e geológico de um perfil de medições de subsidência (perfil S) (adaptado de Chaminé 1992).

O trabalho realizado permitiu concluir que existe uma relação de controlo geológico-estrutural da subsidência mineira na área envolvente de Germunde (pormenores em Chaminé 1992; Chaminé e Silva 1993, 1997; Gaspar et al. 1994b, 1995a), sendo de realçar os seguintes tópicos:

(i) A análise e revisão pormenorizada da cartografia geológica de superfície do setor de Germunde-Serrinha permitiu estabelecer, à partida, uma relação entre a fraturação regional fotointerpretada e a localização de algumas descontinuidades à superfície. Esses sistemas de fraturação provocam, essencialmente, o desvio da orientação principal média das descontinuidades (NO-SE e NNE-SSO) que se vão aproximando localmente daquelas fraturas regionais;

(ii) A sobreposição da cartografia geológica geral e de pormenor efetuada com a cartografia das descontinuidades provocadas pela subsidência mineira, permitiu caracterizar os aspetos litológicos e estruturais que condicionaram a localização das descontinuidades à superfície do terreno. O mapa das isolinhas de velocidade de subsidência evidencia a existência de um forte controlo geológico-estrutural no grau e na distribuição da subsidência mineira;

(iii) A designada “Quebra Vertical” (Q.V.) aflora nos terrenos do Ordovícico como um importante alinhamento estrutural com ca. de 1400 m de extensão. Este alinhamento coincide, em parte, com um lineamento tectónico com orientação média NO-SE, aflorante nos xistos ardosíferos, muito próximo do contacto com o “quartzito Armoricano”, bem como há um evidente paralelismo com a orientação média do contacto tectónico entre as formações do Ordovícico e do Carbonífero (cavalgamento de teto deste sistema). Nos terrenos do Ordovícico destacam-se três litologias, com comportamentos geomecânicos distintos, nomeadamente, quartzitos maciços, quartzitos xistoides e xistos ardosíferos. Os contactos entre estas litologias, com nítidos contrastes de competência, funcionam como planos de anisotropia favoráveis à instalação de descontinuidades. Verifica-se, por exemplo, que a Q.V. se instala preferencialmente em xistos ardosíferos, nas proximidades do contacto com quartzitos xistoides, bem como em quartzitos maciços com intercalações finas de xisto;

(iv) As minas para captação de água a NE das formações do Carbonífero oferecem condições privilegiadas para o estudo do fenómeno de subsidência mineira. Estas são, em regra, abertas e ligeiramente inclinadas para a saída, a fim de permitir que a água corra livremente, mas quando afetadas pela subsidência, o fundo da mina fica frequentemente mais baixo que a entrada. Os assentamentos verificados, que podem ser superiores a 50 cm, localizam-se preferencialmente em planos de falha, com estrias, preenchidos por argila. As diáclases estão por vezes abertas, mas, no geral, não evidenciam sinais de movimentação.

Os trabalhos de investigação geológica desenvolvidos (Figuras 5, 6 e 7) demonstraram claramente o importante papel que a fraturação regional desempenhou, tanto na localização de algumas descontinuidades à superfície, como no desvio de orientação por elas sofrido, em alguns pontos do terreno. São particularmente importantes as fraturas de orientação NO-SE, paralelas

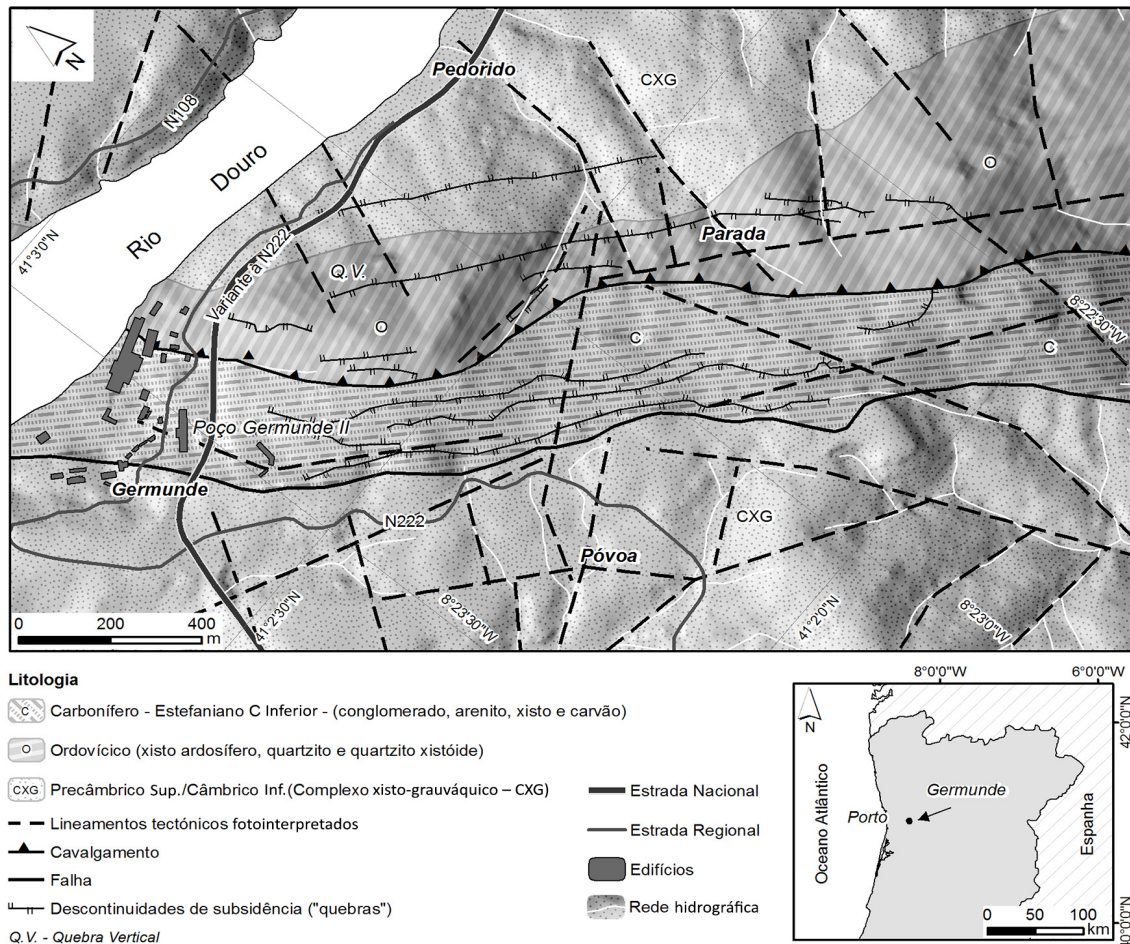


Figura 5 – Mapa geológico-estrutural de superfície e da subsidência mineira do setor de Germunde-Serrinha (revisto e atualizado de Chaminé 1992).

ao alinhamento geral da Bacia Carbonífera do Douro, principalmente no que se refere à adaptação das descontinuidades a tais alinhamentos tectónicos pré-existentes. Por outro lado, as fraturas transversais à Bacia Carbonífera, de orientação média NE-SO, têm um papel preponderante no desvio de orientação sofrido por algumas descontinuidades. Convém sublinhar que a posição de grande parte das descontinuidades observadas no terreno sofreu, a par de um controlo estrutural exercido, fundamentalmente, pela fraturação regional, um forte controlo litológico que se manifesta pela diferença de competência dos materiais (Chaminé e Silva 1993, 1997).

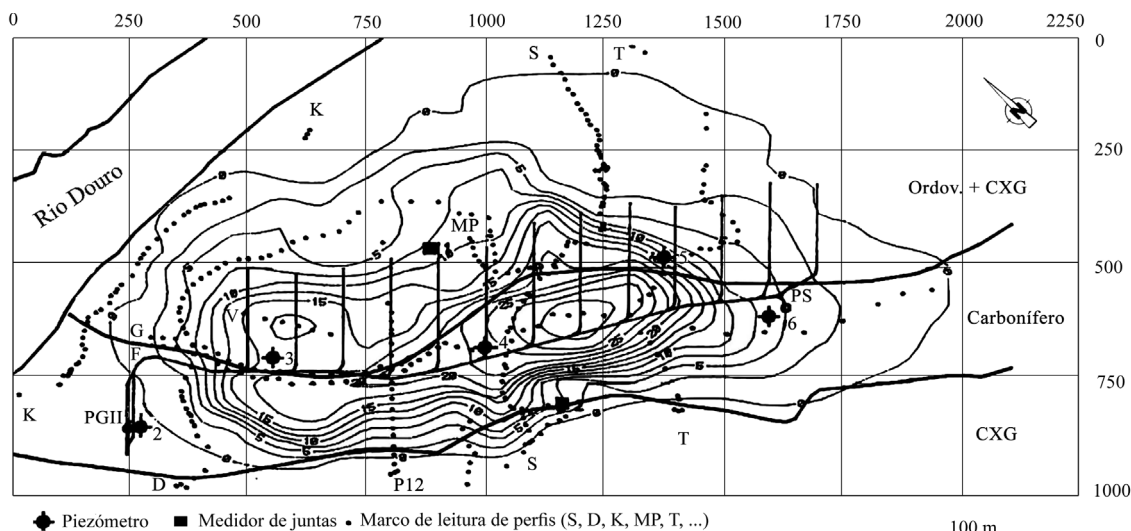


Figura 6 – Exemplo de um mapa de isovelocidades de subsidência (mm/mês) na região de Germunde, no período de novembro de 1990 a junho de 1994 (adaptado e revisto de ECD 1995). *Nota: as coordenadas de origem (0,0) correspondem às coordenadas geodésicas (177855.344, 453199.500), na fronteira do domínio foi atribuído o valor zero para a velocidade de subsidência e as galerias-travessas representadas da mina de Germunde referem-se ao 7.º Piso.*



Figura 7 – Efeitos da subsidência mineira em habitações e muro suporte na área de Germunde (Perfil S). Confrontar com os esquemas da Figura 1 (Fotografias: Helder I. Chaminé, abril de 1991). In: Chaminé (1992).

5. ANÁLISE DOS REGISTOS DA SUBSIDÊNCIA MINEIRA

A partir de 1982, iniciaram-se os trabalhos de observação dos movimentos da superfície do terreno, recorrendo-se à realização periódica de levantamentos topográficos dos pontos dessa superfície, materializados por brocas convenientemente cravadas no substrato rochoso, constituindo nove linhas de marcos de observação (i.e., as linhas D, K, F, G, MP, P, S, T e V). Para pormenores sobre o registo, a interpretação e a evolução da subsidência mineira na região de Germunde, consultar, por exemplo, os trabalhos da ECD (1992, 1995), de Dutra (1993) e de Dinis da Gama (2000). A interpretação dos valores medidos no terreno fundamentou-se na caracterização da evolução de dois tipos de dados numéricos que refletem a tendência geral do fenómeno de subsidência (ECD 1992, 1995): (i) o primeiro, de natureza intrínseca, relaciona-se com os valores das cotas dos marcos obtidos periodicamente; (ii) o segundo, de carácter derivado, provém do cálculo das velocidades de subsidência, que mais não são do que os quocientes entre as diferenças das cotas medidas (no mesmo marco) em dois instantes sucessivos pelo referido intervalo de tempo, adotando-se para essa velocidade as unidades de mm/mês.

A vantagem conseguida com o cálculo da velocidade média de subsidência por mês foi o facto de assim poder homogeneizar todas as medições obtidas em intervalos de tempo não regulares e estende-las a toda a área que era objeto da monitorização. O estudo passou então pela caracterização da evolução da subsidência através dos seguintes parâmetros (Dinis da Gama 2000): (i) velocidade média da subsidência mensal, correspondente a cada período de tempo compreendido entre levantamentos sucessivos; (ii) média móvel da velocidade de subsidência, ponderada em função dos intervalos de tempo em que se efetuaram os levantamentos sucessivos; (iii) representação de curvas de isovalores para as velocidades de subsidência, bem como para a subsidência acumulada entre 1966 e 1991, e de 1991 a 1998.

Pretendeu-se analisar a evolução do processo de subsidência na região em estudo, através da interpretação dos valores medidos ao longo do tempo, na rede de marcos topográficos disponíveis, que abrange cerca de 390 pontos, de modo a ser representativa de toda a área afetada. Para obter o resultado pretendido, foi necessário preparar os dados de origem, desenvolvendo-se os seguintes passos (ECD 1992, 1995): (i) obtenção das cotas de todos os marcos em cada duas campanhas topográficas sucessivas, de modo a determinar a respetiva diferença; (ii) separação dos dados que se referem a subidas do terreno (diferenças negativas), dos que são relacionados com a subsidência (diferenças positivas); (iii) obtenção dos valores médios das diferenças de cotas, para ambos os grupos, positivos e negativos; iv) divisão pelo número de meses compreendidos entre elas, para cálculo da velocidade mensal de subsidência.

Após o tratamento designado acima, construiu-se o correspondente gráfico (Figura 8), onde se verifica que os desenvolvimentos dos mesmos apresentam curvas decrescentes, à medida que decorre o tempo, levando a concluir que o estado de equilíbrio se instala progressivamente, com

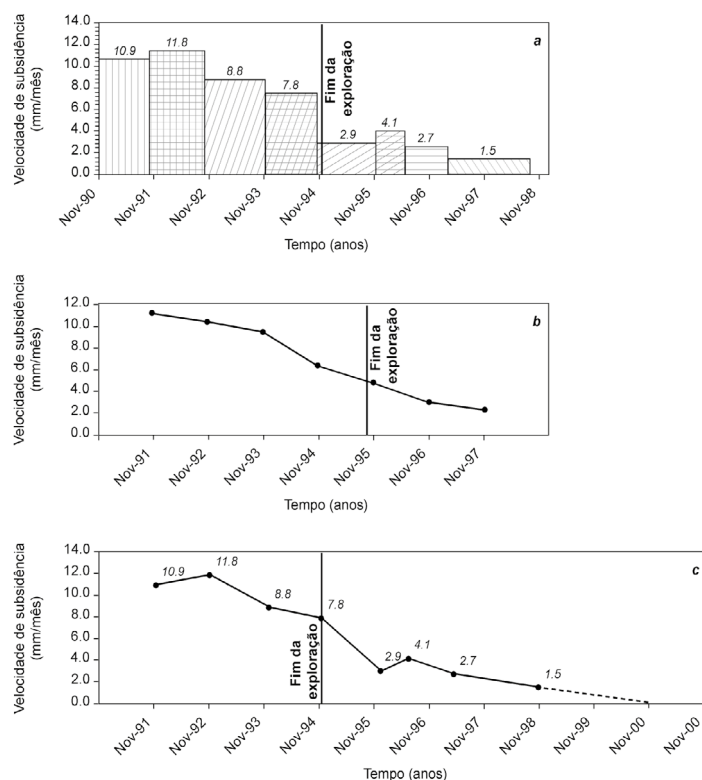


Figura 8 – Evolução da subsidência mineira (adaptado de Dinis da Gama 2000): a) Evolução da subsidência média mensal entre 1991 e 1998; b) Médias móveis ponderadas para a velocidade média da subsidência; c) Previsão da data de anulação dos fenómenos de subsidência.

uma tendência generalizada para a estabilidade dos terrenos superficiais da região em estudo.

Além da informação sobre o estado de progressão das velocidades de subsidência, interessa saber em que áreas estes fenómenos são mais intensos, e com que intensidade relativa os mesmos se verificam. Para atingir tal objetivo, recorreu-se à construção das curvas de isovalores das velocidades médias mensais de subsidência, recorrendo aos seguintes procedimentos (ECD 1992, 1995): (i) criação da base de dados de trabalho, utilizando as velocidades totais da subsidência para os anos considerados; (ii) correção das coordenadas geodésicas dos pontos, efetuada a partir de uma rotação no valor de 51° , em torno da coordenada

(177855.344, 453199.500), que passou a ser a origem relativa dos desenhos (cf. Figura 6).

A construção dos gráficos com as curvas de isovalores, segundo este formato, permitiu um melhor enquadramento da área de interesse, bem como a comparação com trabalhos anteriores que apresentam o mesmo formato. Além destes, foi ainda elaborado o gráfico com curvas de isovalores para a subsidência acumulada, de modo a facultar a visualização do fenómeno de subsidência entre 1991 e 1998, e a sua comparação com os gráficos de curvas de isovalores de subsidência entre 1966 e 1991, realizados com base no modelo matemático e com base nos levantamentos topográficos.

A aplicação do método de cálculo das médias móveis à variável escolhida (a velocidade média mensal de subsidência estendida a todos os marcos da região) para caracterizar a evolução do fenómeno, permite correlacionar a informação existente com a do ano anterior e do ano subsequente, esclarecendo as tendências do comportamento da superfície. O Quadro 1 contém os resultados dos cálculos efetuados neste contexto.

Seguiu-se a construção do gráfico relativo à evolução temporal da citada variável, em que os resultados obtidos podem ser observados na Figura 8. Verifica-se que o desenvolvimento da curva é muito semelhante ao referido, revelando, incontestavelmente, a tendência decrescente do fenómeno de subsidência.

Na realização do estudo, a consideração de alguns valores de grandeza anómala, não foi posta de parte, tendo uma cuidadosa observação levado a considerá-los como casos pontuais, possivelmente alguns deles constituídos por erros ligados ao tratamento dos dados topográficos, que se diluem no universo bastante mais amplo considerado. A apreciação dos resultados obtidos graficamente levou a considerar que os efeitos da subsidência na área da mina do Pejão têm vindo a atenuar-se ao longo dos últimos anos, mais intensamente após o encerramento de suas atividades (finais de 1994).

Os estudos elaborados com base nos levantamentos topográficos executados periodicamente na área afetada pela exploração de carvão no Pejão, e particularmente em Germunde, conduziram, através de métodos alternativos, a conclusões assinalavelmente concordantes entre si, segundo as quais se verificou no terreno um decréscimo progressivo dos movimentos de subsidência que já ocorriam anteriormente. A diminuição da intensidade dos fenómenos de subsidência foi patente a partir de 1994, época em que cessaram as atividades produtivas da mina, tendo, depois disso, apresentado uma tendência geral de atenuação (Dinis da Gama 2000).

Segundo Dinis da Gama (2000), os fatores que contribuíram primordialmente para estas manifestações foram a suspensão dos trabalhos de desmonte mineiro, que eram seguidos do abatimento dos tetos, deixando de promover movimentações descendentes de volumes rochosos e, ainda, a eliminação das operações de bombagem das águas que afluíam aos vários níveis da

Quadro 1 – Valores das médias móveis ponderadas da velocidade média de subsidência dos marcos topográficos na região de Germunde (adaptado de Dinis da Gama 2000).

Ano de referência	Velocidade média de subsidência (mm/mês)	Fator de ponderação	Média móvel (mm/mês)
1990	8.913	1	-
1991	10.87	12	11.219
1992	11.759	12	10.438
1993	8.819	13	9.485
1994	7.785	11	6.441
1995	2.922	13	4.776
1996	4.073	6	3.072
1997	2.669	10	2.296
1998	1.497	-	-

mina, provocando uma inundação das cavidades, suscetível de as estabilizar, de modo a reduzir as roturas de tetos dos desmontes. Este último comportamento foi observado através da subida contínua do nível de água, no interior do Poço Germunde II, até ao nível freático alcançar cotas no interior do maciço da mina que correspondem a um equilíbrio hidrogeológico.

Os métodos de análise utilizados neste estudo (ECD 1992, 1995; Dutra 1993) tornam possível responder à questão, que naturalmente se coloca, sobre quando se verificaria a anulação total desses fenómenos. A Figura 8 sugere que a data de referência para esta questão é novembro de 2000. De qualquer modo, segundo Dinis da Gama (2000), a magnitude dos valores dos movimentos verificados após o encerramento da exploração de carvão tem evoluído em moldes que garantem a ausência de danos estruturais significativos nas construções à superfície, o que se encontra em sintonia com a manifesta diminuição de queixas por parte das populações residentes na região.

6. IMPLICAÇÕES GEOAMBIENTAIS: BREVES CONSIDERAÇÕES

A subsidência mineira na área de Germunde relaciona-se diretamente com as características geomecânicas do maciço rochoso, tendo repercussões em importantes modificações dos terrenos sobrejacentes aos níveis em que decorria a exploração mineira, bem como nas condições hidrogeológicas (p. ex., Arrais 1988; Lippman e Weissenbach 1988; ECD 1992, 1995; Chaminé 1992; Santos 1998, 2008; Pedrosa et al. 2000; Chaminé et al. 2004; Santos et al. 2005; Gomes e Chaminé 2005).

As deformações mecânicas induzidas pela subsidência mineira podem criar direções preferenciais para o fluxo da água subterrânea no subsolo, quer mudando os planos estruturais das descontinuidades quer modificando o comportamento hidrogeológico reinante (p. ex., Booth 1986; Elsworth e Liu 1995; Chaminé et al. 2004; Kendorski 2006). Tais aspetos podem, por sua vez, alterar os valores da subsidência, pela modificação das características hidrogeomecânicas relacionadas com o preenchimento das fraturas, como também pelo aumento, por exemplo, das tensões efetivas em depósitos superficiais não consolidados.

Um dos aspetos significativos sobre os aluimentos mineiros reporta-se às consequências inevitáveis que estes provocam sob forma de impactos muito acentuados à superfície, nomeadamente em edifícios, em terrenos florestais e campos de cultivo, em vias de comunicação, na rede de distribuição de água e eletricidade, e em captações de água (Kratzsch 1983). O estudo pormenorizado da zona degradada da área de Germunde (Gaspar et al. 1994a, 1995b; ECD 1995) permitiu inventariar e implementar uma estratégia que visava a minimização do impacto socioeconómico e ambiental na região envolvente da mina de carvão de Germunde. Gomes e Chaminé (2005) enquadraram esta realidade no quadro regional do planeamento territorial à escala do concelho de Castelo de Paiva. Finalmente, deve ser

referido o trabalho pertinente de Lemos de Sousa et al. (2010), que aponta para a atualidade de estudos multi e transdisciplinares visando a revalorização do recurso geológico da Bacia Carbonífera do Douro e, outrossim, incorporando novas técnicas e metodologias de investigação. Além disso, a valorização do legado mineiro, das memórias, dos espaços e dos territórios é desejável e compatível com uma abordagem transdisciplinar da área do Pejão (p. ex., Ribeiro 2014; Soares 2021; Teixeira Lopes e Pinheiro 2023).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em jeito de remate final, convém sublinhar que, para além do importante trabalho de fundo realizado pela ECD (1992, 1995), teria sido desejável continuar a investigação e a monitorização de forma sistemática a subsidência mineira na região envolvente de Germunde para uma previsão rigorosa da área de superfície final de subsidência. Outros aspetos de máxima relevância, seriam o desenvolvimento de estudos de deteção remota, neotectónica, investigações de radioatividade natural e estudos hidrogeomecânicos subsuperficiais para despistar possíveis manifestações tectonossísmicas amplificadas pela subsidência mineira (p. ex., ERL 1987; Besson et al. 1999; Estrella et al. 2000; Kies et al. 2006; López-Gayarre et al. 2010; Tang 2011; Xue-yang e Yu-cheng 2012; Chaminé et al. 2015; Liu et al. 2022; Cai et al. 2023; Zhao et al. 2025). Outrossim, a continuação dos estudos pioneiros de hidrogeologia e de geotecnia ambiental encetados pela ECD (1995) e, entretanto, retomados na perspetiva do impacto ambiental causado pelo abandono das explorações subterrâneas do Couto Mineiro do Pejão no intuito de refinar o modelo conceptual hidrogeológico mineiro (Arrais 1988; ECD 1995; Chaminé et al. 2004) e os estudos hidrogeoambientais desenvolvidos na área (p. ex., Santos 1998, 2008; Pedrosa et al. 2000; Santos et al. 2005), com repercussões diretas, por exemplo, no controlo da qualidade da água e na hidrodinâmica subterrânea.

AGRADECIMENTOS

Este artigo de síntese foi elaborado na sequência dos projetos de investigação N.º 7220/AD/761 e N.º 7220/AF/001 da Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (CECA) enquadrados na Empresa Carbonífera do Douro, SA (ECD). São ainda devidos agradecimentos, quer pelo apoio logístico quer pela troca de impressões, aos técnicos e funcionários da ECD, aos alunos de pós-graduação do IST e da FCUP e aos vários consultores dos projetos da CECA. Gratos aos colegas José Teixeira e Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP) pelo apoio à preparação das figuras em formato vetorial. Um bem-haja ao Professor Ary Pinto de Jesus (FCUP) pela troca de impressões e minuciosa revisão do tópico da geologia regional de Germunde. À Manuela Tavares pela cuidadosa revisão da primeira lista bibliográfica e complementada pela minuciosa revisão da

Eng.^a Patrícia Moreira (UFP). Um agradecimento muito especial ao Professor M.J. Lemos de Sousa pelo simpático convite endereçado para a realização deste artigo de síntese, bem como pela leitura crítica meticulosa do manuscrito. Este trabalho é dedicado à memória de Fernando Mello Mendes (1925–2019), insigne engenheiro de minas, professor e investigador de mecânica das rochas e geomecânica mineira no IST e do estimado colega coautor Carlos Mendonça Arrais (1939–2023), notável engenheiro de minas, administrador da ECD e professor adjunto no ISEP nas áreas de sondagens, hidrogeotecnia e gestão de georrecursos que muito contribuíram para as investigações da subsidência mineira do Pejão.

REFERÊNCIAS

- Arrais, C.M., 1988. Afluxos da água à mina: execução de uma travessa-galeria para a drenagem de águas da travessa 406. Germunde: Empresa Carbonífera do Douro, SA., 9 p. (Relatório interno).
- Bahuguna, P.P., Srivastava, A.M.C., e Saxena, N.C., 1991. A critical review of mine subsidence prediction methods. *Mining Science and Technology* 13(3): 369-382.
- Bauer, R.A., 2006. Mine subsidence in Illinois: facts for homeowners. Illinois State Geological Survey, Circular 569, 20p.
- Bauer, R.A., 2008. Planned coal mine subsidence in Illinois: a public information booklet. Illinois State Geological Survey, Circular 573, 19p.
- Bell, F.G., 1975. Site investigations in areas of mining subsidence. London: Newnes-Butterworths, 168p.
- Bell, F.G., Bullock, S.E.T., Hällich, T.F.J., e Lindsay, P., 2001. Environmental impacts associated with an abandoned mine in the Witbank Coalfield, South Africa. *International Journal of Coal Geology* 45(2-3): 195-216.
- Bell, F.G., Stacey, T.R., e Genske, D.D., 2000. Mining subsidence and its effect on the environment: some differing examples. *Environmental Geology* 40(1-2): 135-152.
- Besson, L., Durville, J.-L., Garry, G., Grasz, E., Hubert, T., e Toulemon, M., 1999. Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de terrain. Guide Méthodologique. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'équipement des transports et du logement. La Documentation Française, Paris, 71p.
- Białek, J., Wesołowski, M., Mielimaka, R., e Sikora, P., 2020. Deformations of mining terrain caused by the partial exploitation in the aspect of measurements and numerical modeling. *Sustainability* 12(12): 5072.
- Blachowski, J., e Milczarek, W., 2014. Analysis of surface changes in the Wabrzych hard coal mining grounds (SW Poland) between 1886 and 2009. *Geological Quarterly* 58(2): 353-368.
- Booth, C.J., 1986. Strata-movement concepts and the hydrogeological impact of underground coal mining. *Groundwater* 24(4): 507-515.
- Brady, B.H.G., e Brown, E.T., 2004. Rock mechanics: For underground mining. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 3rd Edition, 628p.
- Briggs, H., 1929. Mining subsidence. London: E. Arnold and Company, 153p.
- Brown, E.T., 1991. Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium (Revista da Ordem dos Engenheiros)* 48(Ano IV): 9-29.
- Cai, Y., Jin, Y., Wang, Z., Chen, T., Wang, Y., Kong, W., Xiao, W., Li, X., Lian, X., Hu, e H., 2023. A review of monitoring, calculation, and simulation methods for ground subsidence induced by coal mining. *International Journal of Coal Science & Technology* 10(32): 1-23.

- Can, E., Mekik, C., Kuscu, S., e Akçin, H., 2011. Subsidence occurring in mining regions and a case study of Zonguldak-Kozlu basin. *Scientific Research and Essays* 6(6): 1317-1327.
- Chaminé, H.I., 1992. Mina de carvão de Germunde: contribuição da geologia para o estudo da geomecânica e subsidência mineira. Relatório de Estágio Profissionalizante. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Empresa Carbonífera Douro, SA. 128p. + 11 anexos. (Relatório inédito).
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Ramos, L., e Pinheiro, R., 2015. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*. Editado por D. Giordan, K. Thuro, C. Carranza-Torres, F. Wu, P. Marinos, C. Delgado. International Association for Engineering Geology and the Environmental (IAEG), Springer 6: 357-361.
- Chaminé, H.I., Arrais, C.M., Pinto de Jesus, A., Silva, P.B., Gomes, A., Teixeira, J., e Dinis da Gama, C., 2004. Geologia e morfoestrutura do sector de Oliveira do Arda-Folgoso (Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão, NW de Portugal): implicações nos afluxos de água à antiga mina de carvão de Germunde. *Tecnologia da Água* 24(Edição II): 28-41.
- Chaminé, H.I., Carvalho, J.M., Teixeira, J., e Freitas, L., 2015. Role of hydrogeological mapping in groundwater practice: back to basics. *European Geologist – Journal of the European Federation of Geologists* 40: 35-43.
- Chaminé, H.I., e Fernandes, I., 2023. The role of engineering geology mapping and GIS-based tools in geotechnical practice. In: *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Editado por C. Chastre, J. Neves, D. Ribeiro, M.G. Neves, P. Faria. Springer Tracts in Civil Engineering, Springer, Cham, pp. 3–27.
- Chaminé, H.I., e Gaspar, A., 1995. Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear: aplicação a uma travessa da mina de carvão de Germunde. *Estudos, Notas e Trabalhos. Instituto Geológico Mineiro* 37: 97-111.
- Chaminé, H.I., e Silva, P.B., 1993. Contribuição da geologia para o estudo da subsidência mineira na mina de carvão de Germunde (NW de Portugal). *Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 18: 281-287.
- Chaminé, H.I., e Silva, P.B., 1997. A subsidência mineira na mina de carvão de Germunde: contribuição da geologia de superfície. *GEOlogos (Revista do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto)* 1: 1-7.
- Cui, X., Zhao, Y., Wang, G., Zhang, B., e Li, C., 2020. Calculation of residual surface subsidence above abandoned longwall coal mining. *Sustainability* 12(4): 1528.
- Cunha, P.P., Lemos de Sousa, M.J., Pinto de Jesus A., Rodrigues, C.F., Telles Antunes, M., e Tomás, C.A., 2012. O carvão em Portugal: geologia, petrologia e geoquímica (capítulo 5). In: *O carvão na actualidade, Vol. 1 – Petrologia, métodos analíticos, classificação e avaliação de recursos e reservas, papel no contexto energético, carvão em Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa, C.F. Rodrigues e M.A.P. Dinis. Edições Universidade Fernando Pessoa (Porto) e Academia das Ciências de Lisboa, pp. 309-381.
- Dinis da Gama, C., 1991. Qualidade e patologia de obras geotécnicas. In: *Actas do 4.º Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia 3: 1-20.
- Dinis da Gama, C., 2000. Evolução da subsidência após o encerramento da Mina do Pejão. Lisboa: Instituto Superior Técnico (IST), 40p. + 3 figuras. (Relatório inédito).
- Dinis da Gama, C., e Curi, A., 1997. Numerical simulation of the evolution of subsidence in mining areas. In: *Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*. Editado por R.F. Azevedo, E.A. Vargas, L. Ribeiro e Sousa e M. Matos Fernandes. CRC Press, London, pp. 353-363.

- Dinis da Gama, C., e Dutra, J.I.G., 1994. Void migration of analysis for ground subsidence. In: Proceedings 7th International Congress International Association of Engineering Geology. Editado por R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho e A.P. Cunha. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield 4: 1871-1877.
- Dinis da Gama, C., Navarro-Torres, V., Lopes, L., e Nobre, E., 2002. Interpretação geomecânica da subsidência na mina da Panasqueira. In: Actas do 8.º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia 1: 233-244.
- Domingos, C.G., Freire, L.S., Silva, F.G., Gonçalves, F., Pereira, E., e Ribeiro, A., 1983. The structure of intramontane upper Carboniferous Basins in Portugal. In: The Carboniferous of Portugal. Editado por M.J. Lemos de Sousa e T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal 29: 187-194.
- Donnelly, L.J., 2006. A review of coal mining induced fault reactivation in Great Britain. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 39(1): 5-50.
- Donnelly, L.J., 2009. A review of international cases of fault reactivation during mining subsidence and fluid abstraction. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 42(1): 73-94.
- Donnelly, L.J., Culshaw, M.G., e Bell, F.G., 2008. Longwall mining-induced fault reactivation and delayed subsidence ground movement in British coalfields. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 41(3): 301-314.
- Donnelly, L.J., e Rees, J., 2001. Tectonic and mining induced fault reactivation around Barlaston on the Midlands Microcraton, North Staffordshire, UK. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 34(2): 195-214.
- Dunrud, C.D., 1976. Some engineering geologic factors controlling coal mine subsidence in Utah and Colorado. Washington, USA: Geological Survey Professional Paper 969, 39p.
- Dutra, J.I.G., 1993. Análise da subsidência induzida pela mineração em maciços rochosos muito fracturados. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 312p. (Tese de Doutoramento).
- ECD (Empresa Carbonífera Douro S.A.), 1992. Modelagem computacional da subsidência mineira em jazigos de carvão muito inclinados. Pedorido: Relatório Final, 105p. (Comunidade Económica do Carvão e Aço; convenção n.º 7220/AD/761. Direcção Geral da Energia. Investigação Tecnológica do Carvão).
- ECD (Empresa Carbonífera do Douro S.A.), 1995. Investigação sobre trabalhos superficiais e subterrâneos para minimizar os efeitos da subsidência de minas de carvão com camadas sub-verticais. Pedorido: Relatório Final, 229p. (Comissão das Comunidades Europeias, Direcção Geral Energia-DGXVII, Investigação Tecnológica Carvão, Convenção N.º 7220/AF/001).
- Elsworth, D., e Liu, J., 1995. The influence of mining induced subsidence on groundwater resources. In: Land Subsidence (Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague). International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publications 234: 141-148.
- ERL (Environmental Resources Limited), 1987. Environmental impact assessment. The report prepared for British Coal. ERL, London, 85p.
- Estrella, T.R., Manteca, J.I., e García, C., 2000. Subsidencia minera, en relación con sismotectónica, en la Unión (Murcia). In: V Congreso Geológico de España, Alicante. Editado por J.C. Cañaveras, F. Colombo e M.A. García del Cura. Geotemas 1(3): 149-153.
- Farinas de Almeida, A., 1944. A pressão dos terrenos em lavra de minas: introdução geral ao seu estudo. Porto, 230p. (Dissertação de concurso a uma vaga de professor catedrático do 4.º grupo da Faculdade de Engenharia do Porto).

- Freire, J.L.S., 1989. Bacia Carbonífera do Norte de Portugal: algumas reflexões sobre o estado actual dos conhecimentos após a fase de reconhecimento de 1983/87 e sugestões para complemento da inventariação. *Estudos, Notas e Trabalhos, Direção Geral Geologia e Minas* 31: 11-27.
- Gaspar, A.F., Arrais, C.M., Barriga, J.P., Silva, P.B., e Dinis da Gama, C., 1994a. Impacts caused by mining subsidence in the Germunde coal mine (NW of Portugal). In: *Proceedings 7th International Congress*. Editado por R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho e A.P. Cunha. International Association of Engineering Geology. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield 6: 2747-2752.
- Gaspar, A.F., Arrais, C.M., e Dinis da Gama, C., 1995b. Subsidência na mina de carvão de Germunde: contribuição para a delimitação e avaliação da zona degradada. In: *5.º Congresso Nacional de Geotecnia*. Coimbra: Sociedade Portuguesa de Geotecnia 1: 97-106.
- Gaspar, A.F., Chaminé, H.I., e Silva, P.B., 1995a. Controlo geológico-estrutural da subsidência mineira na mina de carvão de Germunde. In: *Memórias do Museu e Laboratório Geológico e Mineralógico do Porto*. Editado por F. Sodré Borges e M. Marques. Universidade de Ciências do Porto 4: 455-459.
- Gaspar, A.F., Silva, P.B., e Chaminé, H.I., 1994b. Mining subsidence and its relation with geological features in the Germunde coal mine (NW of Portugal). In: *Proceedings 7th International Congress*. Editado por R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho e A.P. Cunha. International Association of Engineering Geology. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield 6: 4441-4444.
- Géochronique, 1998. Travaux souterrains et affaissements. Société Géologique de France, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRG) 66: 4-17.
- Gomes, A., e Chaminé, H.I., 2005. Cartografia geológica e geomorfológica para a caracterização de riscos naturais à escala do planeamento regional: aplicação ao Concelho de Castelo de Paiva (NW de Portugal). *Xeográfica: Revista de Xeografia, Território e Medio Ambiente*, Santiago de Compostela 5: 85-105.
- Gray, R.E., 1990. Mining subsidence: past, present, future. *International Journal of Mining and Geological Engineering* 8(4): 400-408.
- Guney, A., e Gul, M., 2019. Analysis of surface subsidence due to longwall mining under weak geological conditions: Turgut basin of Yatağan-Muğla (Turkey) case study. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 33(7): 445-461.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 1984. Estudio básico de los parámetros geotécnicos que permiten definir y proteger en superficie las zonas influenciadas por explotaciones subterráneas de carbón. Madrid: Ministerio de Industria y Energía, Comisaria de Energía y Recursos Minerales, 109p.
- Kendorski, F.S., 2006. Effect of full-extraction underground mining on ground and surface waters a 25-year retrospective. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, West Virginia, USA, pp. 1-6.
- Kenny, R., 1992. Fissures: legacy of a drought. *Earth Magazine* 1(3): 34-41.
- Kies, A., Storoni A., Tosheva Z., e Hofman H., 2006. Radon measurements as a monitoring possibility for mining subsidence occurrence. *Journal of Mining Science* 42(5): 518-522.
- Korose, C.P., Louchios, A.G., e Elrick, S.D., 2009. The proximity of underground mines to urban and developed lands in Illinois. Champaign, Illinois: Institute of Natural Resource Sustainability, Illinois State Geological Survey, Circular 575, 92p.
- Kratzsch, H., 1983. Mining subsidence engineering. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 543p.
- Lee, D.K., Mojtabai, N., Lee, H.B., e Song, W.K., 2013. Assessment of the influencing factors on subsidence at abandoned coal mines in South Korea. *Environmental Earth Sciences* 68(3): 647-654.

- Lee, S., Park, I., e Choi, J.K., 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. *Environmental Management* 49(2): 347-358.
- Lemos de Sousa, M.J., 1973. Contribuição para o conhecimento da Bacia Carbonífera do Douro. Universidade do Porto, 2 Volumes, 427p. + 36 Estampas. (Tese de Doutoramento).
- Lemos de Sousa, M.J., 1977. Sobre alguns problemas do Permo-carbónico continental português. Lisboa: *Ciências da Terra* 3: 9-22.
- Lemos de Sousa, M.J., 1978a. O grau de incarbonização (rang) dos carvões durienses e as consequências genéticas, geológicas e estruturais que resultam do seu conhecimento. Lisboa: *Comunicações Serviços Geológicos de Portugal* 63: 179-365.
- Lemos de Sousa, M.J., 1978b. Contribution à l'étude du bassin houiller du Douro (NW du Portugal). Atlas de micropétrographie des peranthracites. Lisboa: *Memórias Serviços Geológicos de Portugal, Nova Série*, n.º 26, 92p.
- Lemos de Sousa, M.J., (Editor), 1983. Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula, Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, 259p.
- Lemos de Sousa, M.J., 1984a. Carta geológica de Portugal na escala de 1/50000. Notícia Explicativa da folha 9-D (Penafiel): aditamento relativo ao Carbonífero. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Lemos de Sousa, M.J., 1984b. Os carvões da Bacia Carbonífera do Douro. Lisboa: *Geonovas (Revista Associação Portuguesa de Geólogos)* 6: 101-110.
- Lemos de Sousa, M.J., e Oliveira, J.T., (Editores), 1983. The Carboniferous of Portugal. Lisboa: *Memórias Serviços Geológicos de Portugal*, n.º 29, 211p.
- Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., (Editores), 1985. Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics and Geochronology). Porto: *Anais Faculdade de Ciências, Suplemento ao Volume 64 (1983)*, 498p.
- Lemos de Sousa, M.J., Pinto de Jesus, A., Chaminé, H.I., e Rodrigues, C.F., 2013. Carlos Ribeiro e o carvão em Portugal. In: Carlos Ribeiro (1813-1882), Geólogo e Arqueólogo (Homenagem da Câmara Municipal de Oeiras e da Academia das Ciências de Lisboa nos 200 anos do seu nascimento). Editado por J.L. Cardoso. *Estudos Arqueológicos de Oeiras, Câmara Municipal de Oeiras* 20: 137-154.
- Lemos de Sousa, M.J., Rodrigues, C.F., Tato Diogo, M., Pinto de Jesus, A., Mouraz Miranda, A., Dinis, M.A.P., Oliveira, G.M., Chaminé, H.I., Dinis da Gama, C., e Arrais, C.M., 2010. Carvões portugueses: A revalorização moderna possível de um recurso geológico. O caso-de-estudo da Bacia Carbonífera do Douro. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Editado por J.M. Cotelos Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha e M. Magalhães Ramalho. Vol. II, Lisboa, Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, Geologia Aplicada, pp.157-186. (Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra).
- Lippman, L., e Weissenbach, W., 1988. Underground water influx and surface movements close to the Douro River at the coal mine Pejão (Portugal): result of seminar in January and February 1988. West Germany, Essen: Grundstofftechnik GmbH, 81p. (Relatório inédito).
- Liu, J., Ma, F., Li, G., Guo, J., Wan, Y., e Song, Y., 2022. Evolution assessment of mining subsidence characteristics using SBAS and PS interferometry in Sanshandao Gold Mine, China. *Remote Sensing* 14(2): 290.
- Lokhande, R.D., Prakash, A., Singh, K.B., e Singh, K.K., 2006. Subsidence control measures in coal mines: a review. *Journal of Scientific and Industrial Research* 64(5): 323-332.
- López-Gayarre, F., Álvarez-Fernández, M.I., González-Nicieza, C., Álvarez-Vigil, A.E., e Herrera-García, G., 2010. Forensic analysis of buildings affected by mining subsidence. *Engineering Failure Analysis* 17(1): 270-285.

- Machado, A.C.D., 1970. As minas de carvão do Pejão. *Boletim de Minas* 7(4): 259-281.
- Machowski, R., Solarski, M., Rzetala, M.A., Rzetala, M., e Hamdaoui, A., 2024. The impact of hard coal mining on the long-term spatio-temporal evolution of land subsidence in the urban area (Bielszowice, Poland). *Resources* 13(12): 167.
- Marino, G., Zamiran, S., e Talebi, M., 2020. Investigation of the horizontal displacement of ground surface due to longwall mining. *Geotechnical and Geological Engineering* 38(5): 5373–5387.
- Marschalko, M., Bednárík, M., Yilmaz, I., Bouchal, T., e Kubečka, K., 2012. Evaluation of subsidence due to underground coal mining: an example from the Czech Republic. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 71(1): 105-111.
- Marschalko, M., Yilmaz I., Křístková, V., Fuka M., Kubečka, K., e Bouchal, T., 2013. An indicative method for determination of the most hazardous changes in slopes of the subsidence basins in underground coal mining area in Ostrava (Czech Republic). *Environmental Monitoring and Assessment* 185(1): 509-522.
- Mello Mendes, F., 1985. *Geomecânica aplicada à exploração mineira subterrânea*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 436p.
- NCB (National Coal Board), 1975. *Subsidence engineers handbook*. London: National Coal Board Mining Department, 2.^a Edição, 111p.
- Oh, H.J., e Lee, S., 2011. Integration of ground subsidence hazard maps for abandoned coal mines in Samcheok, Korea. *International Journal of Coal Geology* 86(1): 58-72.
- Parker, J., 1973/1974. *Practical rock mechanics for miners*. Engineering and Mining Journal Publication, 39p.
- Pedrosa, M.Y., Machado, M.J., e Santos, R., 2000. Hidrogeologia do couro mineiro do Pejão: notas preliminares. In: *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Editado por J. Samper, T. Leitão, L. Fernández e L. Ribeiro. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones. A Coruña. Asociación Internacional de Hidrogeólogos–Grupo Español/Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Publicaciones ITGE, Madrid. pp. 467-473.
- Peng, S.S., 1978. *Coal mine ground control*. New York: John Wiley & Sons, 450p.
- Peng, S.S., 1992. *Surface subsidence engineering*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 161p.
- Pérez, C.R., Oyanguren, P.R., Alonso, C.O., Tamamas, B.C., e Orellana, A.J.C., 1986. *Hundimientos mineros: métodos de cálculo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 328p.
- Pinto de Jesus, A., 1987. Bassin Houiller du Douro (NW du Portugal); Stratigraphie et contrôle tectonique de la genèse et de l'évolution. *Lille: Annales de la Société Géologique du Nord* 106: 209-217.
- Pinto de Jesus, A., 2019. Carboniferous intermontane basins of Portugal (section 11.3.8 of Synorogenic Basins by Oliveira et al.). In: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*. Volume 2: The Variscan Cycle. Editado por C. Quesada, e J.T. Oliveira. Regional Geology Reviews, Springer, Cham, pp. 402-405.
- Pinto de Jesus, A., 2003. Evolução sedimentar e tectónica da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 28: 107-125.
- Pinto de Jesus, A., e Gaspar, A.M.F., 1997. Contribuição para o conhecimento das condicionantes geológicas das reservas exploráveis na Bacia Carbonífera do Douro. Aplicação à Mina de Germunde. *GEOlogos (Revista Departamento Geologia, Universidade do Porto)* 1: 35-41.
- Pinto de Jesus, A., e Lemos de Sousa, M.J., 1998. Modelo deposicional da Bacia Carbonífera do Douro na região de Sete Casais (Sector NW do Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão). In: *Actas do V Congresso Nacional de Geologia (Resumos Alargados)*. Lisboa: Comunicações do Instituto Geológico Mineiro, 84(1): A-22-A25.

- Pinto de Jesus, A., Lemos de Sousa, M.J., Chaminé, H.I., Dias, R., Fonseca, P.E., e Gomes, A., 2010. O Carbonífero em Portugal. In: Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História. Vol. I, Geologia Clássica. Editado por J.M. Coteló Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha, e M. Magalhães Ramalho. Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, pp. 341-355. (Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra).
- Ribeiro, C., 1858. Memória sobre as minas de carvão dos distritos do Porto e Coimbra, e de carvão e ferro do distrito de Leiria. Memórias da Academia Real das Ciências de Lisboa 1(Pt. 2): 229-244.
- Ribeiro, D.P.A., 2014. Valorização do legado mineiro: as minas do Pejão. In: Paisagens, Patrimónios, Turismos. Editado por R. Jacinto e V. Cabero-Diéguez. Lisboa: Âncora Editora, pp. 85-93.
- Rodríguez, R., e Toraño, J., 2000. Hypothesis of the multiple subsidence trough related to very steep and vertical coal seams and its prediction through profile functions. *Geotechnical & Geological Engineering* 18(4):289-311.
- Sanmiquel, L., Bascompta, M., Vintró, C., e Yubero, T., 2018. Subsidence management system for underground mining. *Minerals* 8(6): 243.
- Santos, R., 1998. Estudo hidrogeológico e hidroquímico da área envolvente do couro mineiro do Pejão: dados preliminares. Relatório de Estágio Profissionalizante. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Instituto Geológico e Mineiro, 139p. + 7 anexos. (Relatório inédito).
- Santos, R., 2008. Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica da área mineira de Germunde, Pejão. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 212p. + 4 anexos. (Tese de Doutoramento).
- Santos, R., Ribeiro, L., e Carvalho-Dill, A., 2005. The use of multivariate statistical analysis to evaluate spatial and temporal water contamination in Germunde coal mine (Portugal). In: *Mine Water 2005 – Mine Closure*. Edited by J. Loredó e F. Pendas. Proceedings of the 9th International Mine Water Association Congress, Oviedo, pp. 439-450.
- Singh, K.B., e Dhar, B.B., 1997. Sinkhole subsidence due to mining. *Geotechnical & Geological Engineering* 15(4): 327-341.
- Singh, M.M., 1991. Mining subsidence. In: *SME Mining Engineering Handbook*. Editado por H.L. Hartman. Society of Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., pp. 938-971.
- Soares, E.R., 2021. Uma visão do lugar através da ruína: o caso do complexo de Germunde no Couto Mineiro do Pejão. Escola de Arquitetura, Universidade do Minho, 2 volumes, 137p. (Dissertação de Mestrado).
- Sütő, L., 2010. Mining: extraction of fossil fuels. In: *Anthropogenic geomorphology: a guide to man-made landforms*. Editado por J. Szabó, L. Dávid e D. Lóczy. Springer, pp. 131-154.
- Swift, G., 2014. Relationship between joint movement and mining subsidence. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(1): 163-176.
- Tang, F.Q., 2011. Mining subsidence monitoring using the method of combining InSAR and GPS technology. *Journal of Coal Science and Engineering (China)* 17(2): 133-136.
- Teixeira Lopes, J., e Pinheiro, S., (organizadores), 2023. Memórias com futuro: o olhar da sociologia sobre as atividades mineiras do Pejão e Regoufe. Porto: Instituto de Sociologia da Universidade do Porto, 78p.
- Thompson, J.A., Lamb, D.W., Frazier, P.S., e Ellem, B., 2011. Monitoring the effects of longwall mine-induced subsidence on vineyards. *Environmental Earth Sciences* 62(5): 973-984.
- Trent, B.A., Bauer, R.A., e DuMontelle, P.B., 1988. Bibliography of subsidence-related literature. Illinois Mine Subsidence Research Program. USA: Illinois State Geological Survey, 190p.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., e Tuncay, E., 2001. Causes, mechanism and environmental impacts of instabilities at Himmetoğlu coal mine and possible remedial measures. *Environmental Geology* 40(6): 769-786.

- Wagner, H., e Schümann, E.H.R., 1991. Surface effects of total coal-seam extraction by underground mining methods. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 91(7): 221-231.
- Wagner, H., Ribeiro, A., e Lemos de Sousa, M.J., 1984. A Bacia Carbonífera do Douro: reinterpretação da geologia do sector Germunde-Choupelo. Recomendações para a investigação geológico-mineira deste sector e de sectores anexos. Fornelo, 17p. (Relatório inédito).
- Wardell, K., 1954. Some observations on the relationship between time and mining subsidence. *Institution of Mining Engineers Transactions* 113: 471-483; 113:799-814.
- Wardell, K., 1969. Ground subsidence and control. *Mining Congress Journal* 55(1): 35-42.
- Wardell, K., 1971. The effects of mineral and other underground excavations on the overlying ground surface. In: *Proceedings of a Symposium on Geological and Geographical Problems of Areas of High Population Density*. Association of Engineering Geologists, pp. 201-217.
- Whittaker, B.N., e Reddish, D.J., 1989. *Subsidence: occurrence, prediction and control*. Amsterdam: Elsevier Science, 528p.
- Xue-yang, S., e Yu-cheng, X., 2012. Research of the mining subsidence in TongChuan mining area of China forecasting system based on catastrophe theory. In: *Advances in Technology and Management*. Editado por H. Kim. *Advances in Intelligent and Soft Computing* 165: 11-20.
- Zhao, R., Du, S., Zheng, M., Guo, Q., Wang, L., Wang, T., Guo, X., e Fernández, J., 2025. Advances and future directions in monitoring and predicting secondary surface subsidence in abandoned mines. *Remote Sensing* 17(3): 379.

Bacia Carbonífera do Douro: Hidrogeologia e Hidrogeoquímica

RENATA SANTOS^{1,2*}

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP);
Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos. Porto, Portugal

² ACA Engenharia & Construção. Vila Nova de Famalicão, Portugal

* E-mail: renatasantos1974@gmail.com

RESUMO

O presente capítulo é dedicado à caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica da Bacia Carbonífera do Douro (BCD), incidindo sobre o estado atual do conhecimento da hidrogeologia e dos impactos da atividade mineira associados. Neste sentido, fez-se uma revisão bibliográfica do conhecimento hidrogeológico regional da bacia e, em particular, do conhecimento hidrogeológico pormenorizado da mina de Germunde, que foi a última mina do Couto Mineiro do Pejão a ser encerrada.

Palavras-chave: Hidrogeologia, Hidrogeoquímica, Bacia Carbonífera do Douro (BCD), Mina de Germunde, Couto Mineiro do Pejão.

ABSTRACT

This chapter deals with the hydrogeological and hydrogeochemical characterisation of the Douro Coalfield, focusing on the current knowledge regarding hydrogeology and the associated impacts of mining activity. A bibliographical review is made of the regional hydrogeological knowledge of the coalfield, with a particular focus on the detailed hydrogeological of the Germunde colliery, which was the last mine in the Pejão Mining District to close.

Key-words: Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Douro Coalfield, Germunde Colliery, Pejão Mining District.

1. ESTADO DA ARTE

O armazenamento e o regime de circulação da água subterrânea na Bacia Carbonífera do Douro (BCD) são condicionados pela distribuição irregular resultante da sua evolução sedimentar, tectónica e geomorfológica. Do mesmo modo, a sua estrutura alongada NO-SE determinou que a exploração de carvão fosse realizada de forma dispersa nos quatro coutos mineiros: São Pedro da Cova, Pejão, Valdeão e Pederneira (Custódio 2004).

A exploração mineira, que ocorreu durante mais de um século e envolveu a utilização de diferentes métodos de lavra, alterou de forma drástica e permanente as características hidrológicas/hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de grandes áreas da BCD. Todos estes fatores contribuíram para que a maioria dos estudos realizados se tenha limitado a sub-bacias da mesma, pelo que o conhecimento hidrogeológico e hidrogeoquímico regional da BCD é considerado muito incipiente.

A Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica da Folha 1 (Pedrosa 1999) faz referência ao Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (SCDB), onde a BCD se encontra inserida. Esse trabalho sugere que a água no SCDB pode circular a grandes profundidades, dado tratar-se de um alinhamento de grandes falhas e, por isso, poderá constituir uma estrutura altamente condutora para aquíferos profundos. A falta de dados de observação direta (devido à inexistência de captações de águas profundas) não permitiu comprovar o seu real valor.

Gonçalves (2013) estudou a hidrogeologia das áreas de Valongo, Paredes e Arouca no contexto do Anticlinal de Valongo, cujas formações delimitam a Este, por cisalhamento, a BCD. Contudo, não faz qualquer referência às formações carboníferas adjacentes.

No que respeita ao estudo das características hidrogeológicas, o Couto Mineiro do Pejão, mais concretamente, a mina de Germunde, é a área com mais trabalhos conhecidos sobre o tema (p. ex., Arrais 1988; Lippman e Weissenbach 1988; Mello Mendes e Dinis da Gama 1988; ECD 1995; Santos 1998; Pedrosa et al. 2000; Santos e Carvalho Dill 2003; Santos et al. 2004; Chaminé et al. 2004; Santos et al. 2005; Santos 2008; entre outros).

Nas últimas décadas, devido a alterações políticas e à sensibilização ambiental, foram realizados vários estudos para identificar, inventariar e caracterizar o problema das águas e dos solos afetados pela contaminação mineira, de modo a compreender os potenciais impactos e propor medidas de minimização e/ou remediação.

No Couto Mineiro do Pejão, a Empresa Desenvolvimento Mineiro (EDM, SA) efetuou vários estudos durante a fase de fecho/abandono da mina de Germunde, de modo a identificar as soluções de minimização/remediação que deveriam ser aplicadas para reduzir o impacto do seu encerramento (ECD 1995; Dinis da Gama e Arrais 1996; Dinis da Gama 2000).

No âmbito de um protocolo celebrado em 1995, entre a Direção-Geral do Ambiente e o Instituto Geológico e Mineiro, com vista a investigação multidisciplinar do impacto ambiental das minas abandonadas, foram realizados estudos sistemáticos, quer do ponto de vista hidrogeológico, quer geoquímico, no Couto Mineiro do Pejão (CMP), em 3 sectores: Lomba (Mina do Barral), Germunde-Arda e Arda-Pejão. Vários artigos e relatórios foram publicados, sendo de destacar os seguintes: Santos (1998), Canto Machado (1999), Pedrosa et al. (2000), Santos Oliveira e Ávila (1999), Santos Oliveira et al. (2000), Santos Oliveira et al. (2002).

Nos últimos anos, a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) tem promovido vários projetos de investigação de modo a qualificar e quantificar os impactos causados pelas

escombreiras sobre os recursos hídricos, os solos e o ar. Os resultados desses estudos têm sido divulgados em artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutoramento (Ribeiro et al. 2011; Ribeiro et al. 2010; Ribeiro e Flores 2008; Vila et al. 2010; Teixeira 2012; Santos 2013; Cunha 2013).

2. OS IMPACTOS ASSOCIADOS À EXPLORAÇÃO DO CARVÃO NA BCD

As áreas mineiras abandonadas estão associadas a importantes impactos ambientais e geotécnicos, produzindo efeitos negativos nos ecossistemas, na segurança e na saúde pública. Os impactos ambientais produzem repercussões ao nível dos solos, das águas, da qualidade do ar, dos ecossistemas (fauna e flora), do ruído, assim como da paisagem. Já os impactos de carácter geotécnico dependem, sobretudo, do tipo de lavra/exploração praticada, assunto que é abordado noutro capítulo deste livro. Importa, contudo, referir que, no presente capítulo, apenas se irá abordar o impacto ambiental sobre as águas, tanto superficiais como subterrâneas.

A água é utilizada em diferentes processos e etapas ao longo do ciclo de vida de uma mina, podendo os respetivos impactos negativos estar associados:

- À atividade extrativa;
- Ao processo de processamento mineral (lavaria) e deposição dos resíduos mineiros;
- Ao processo de bombagem para rebaixamento do nível freático;
- Às descargas de escombreiras e/ou barragens de rejeitados;
- À etapa de abandono, com inundação da mina e aparecimento de descargas não controladas de águas contaminadas.

No meio hídrico, os impactos negativos encontram-se, predominantemente, associados:

- À alteração das condições hidrológicas e hidrodinâmicas;
- À alteração das características físico-químicas da drenagem mineira.

Na BCD, com o início da exploração do carvão, o regime hidrodinâmico e hidroquímico “inicial” da bacia foi completamente modificado, não sendo atualmente possível dissociar as características hidrogeológicas da bacia da atividade mineira desenvolvida, uma vez que todas aquelas foram totalmente alteradas pelo Homem com a abertura de diversos trabalhos mineiros e deposição dos resíduos em escombreiras.

O final da exploração marcou o início de novos equilíbrios, tanto hidrodinâmico como hidroquímico. No entanto, para compreender os processos que ocorreram nas minas, é necessário entender primeiro os processos que ocorrem na água ao longo do seu circuito.

Do ponto de vista hidrogeoquímico, o processo de inundação provoca uma marcada deterioração da qualidade da água da mina (Younger e Wolkersdorfer 2004; Younger 2000a,b), uma vez que promove a dissolução dos minerais neoformados aquando da exploração, os quais

são frequentemente ricos em metais. No entanto, após a fase de inundação da mina, a qualidade da água tende, de um modo geral, a melhorar. A duração desta etapa (anos ou décadas) depende das condições hidrodinâmicas locais, mas, principalmente, da paragênese mineral.

Esta nova dinâmica, no couro mineiro, cria diferentes tipos de efluentes de drenagem da mina, cujas características físico-químicas são muito variáveis, uma vez que são influenciadas por múltiplos fatores: o local (dimensão, paragênese mineral, morfologia, etc.), as características hidrológicas (dimensão da bacia, taxas de infiltração, acesso e velocidade de circulação da água e oxigénio, etc.), as condições climáticas (temperatura, pluviosidade, etc.), o tipo de exploração, a idade da descarga, entre outros. Além disso, no mesmo couro mineiro, verifica-se que as descargas mineiras apresentam características físico-químicas diferentes de acordo com a respetiva interação com:

- Níveis inundados da mina – a inundação destes níveis serve para limitar o fornecimento de oxigénio e, por conseguinte, controlar a dissolução da pirite;
- Níveis não inundados da mina – a presença constante de oxigénio permite a oxidação contínua da pirite. No entanto, a oxidação contínua da pirite sugere um elevado potencial para o seu esgotamento rápido (Lambert et al. 2004);
- Escombreiras da mina – neste caso, podem ser consideradas as mesmas condições que nos níveis da mina não inundados.

Segundo Rees et al. (2002) podem-se, ainda, distinguir mais dois tipos de descargas:

- Descargas de fonte desconhecida;
- Descargas de furos bombeados.

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático de trabalhos mineiros, incluindo as respetivas fontes de contaminação, possíveis recetores, fluxos de transporte e potenciais processos de atenuação.

Os processos geoquímicos fundamentais comumente associados a minas e escombreiras são considerados semelhantes (Banks 1997). No entanto, o pH final e as características químicas associadas à descarga de água são controladas pela interação entre:

- O acesso ao oxigénio e a sua difusão nas fases reduzidas;
- As taxas de oxidação de sulfuretos e a produção de acidez;
- A disponibilidade de fases minerais básicas (carbonatos, silicatos e óxidos/hidróxidos);
- A sua mistura com outras águas subterrâneas.

A hidrodinâmica do sistema mineiro, também, irá influenciar os possíveis processos geoquímicos. Posto isto, nas galerias da mina, enquanto os trabalhos mineiros decorrem, predomina a oxidação de sulfuretos, sendo seguida pela formação de sais secundários durante a inundação da mina. Após a inundação, o oxigénio deixa de estar disponível, pelo que estas reações são interrompidas. Nas escombreiras e nos trabalhos mineiros não inundados, enquanto existirem sulfuretos, ocorrem

reações de oxidação e acumulação de sais secundários que fornecem constituintes solúveis a longo prazo (Figura 1).

A qualidade da água de drenagem mineira evolui ao longo do tempo (seja num período curto, médio ou longo) em função da qualidade da água infiltrada e da exposição a que os minerais estão sujeitos nas minas abandonadas (Younger 1997).

A maioria dos problemas ambientais associados à exploração de carvão e às respetivas escombreiras pode ser atribuída a uma única causa: a incompatibilidade entre o ambiente geoquímico redutor, em que se encontram as camadas de carvão, e a natureza oxidante da atmosfera e das águas infiltradas (Younger e Wolkersdorfer 2004). No caso das minas de carvão, ocorrem exsurgências de água ácida, caracterizadas por elevadas concentrações em sulfato, ferro, alumínio e manganês, bem como de outros metais tóxicos, embora em concentrações mais baixas. A este problema dá-se o nome de DRENAGEM MINEIRA e constitui um dos principais legados ambientais deixados pela indústria extrativa (Sullivan e Yelton 1988; Williams et al. 2002; López Pamo et al. 2002; Johnson e Hallberg 2005).

A meteorização química dos sulfuretos polimetálicos ocorre através de uma série de reações químicas interligadas, que são desencadeadas por processos de interação mineral-água e mineral-atmosfera. Ao longo destas reações, são libertados diferentes contaminantes, tanto no interior da mina como na escombreira e no ciclo hídrico, tornando-se móveis e, consequentemente, acessíveis como potenciais solutos tóxicos (Younger et al. 2002). A cinética de cada reação é diferente, dependendo das condições que prevalecem no meio, permitindo a criação de um ciclo

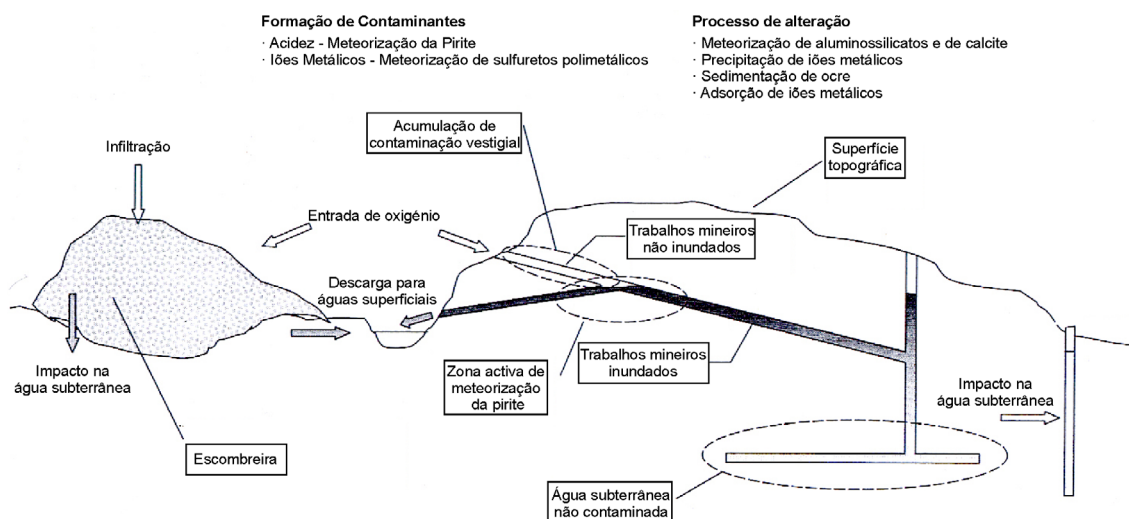


Figura 1 – Diagrama de trabalhos mineiros onde se observam as fontes de contaminação, o fluxo de transporte e as zonas alvo de risco de contaminação em ambientes mineiros (adaptado de Younger et al. 2002).

complexo de reações durante a oxidação dos sulfuretos. A sua descrição exaustiva ultrapassaria os objetivos deste trabalho, uma vez que existem publicações de excelente qualidade sobre esta temática (Singer e Stumm 1970; Wiersma e Rimstidt 1984; Strömberg e Banwart 1994; Nicholson 1994; Stumm e Morgan 1996; Nordstrom e Southam 1997; Banks et al. 1997b; Rose e Cravotta III 1998; Peiffer e Stubert 1999; Holmes e Crundwell 2000; Rimstidt e Vaughan 2003; Younger et al. 2002; Collon 2003; Banks 2004; Gleisner 2005; Cravotta III 2008; Cravotta et al. 2014).

Segundo Hedin et al. (1994) e Rose e Cravotta III (1998), é possível distinguir e classificar dois grandes tipos de drenagem mineira, tendo em conta a acidez total dos respetivos efluentes:

- Drenagem Mineira Ácida (DMA), quando a acidez total excede a alcalinidade total;
- Drenagem Mineira Neutra (DMN), quando a alcalinidade total é igual ou superior à acidez total.

No Couto Mineiro do Pejão é possível observar estas diferenças hidroquímicas, como se verá a seguir.

3. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

3.1. Geral

O estudo hidrogeológico da BCD não pode ser dissociado do problema da contaminação mineira, resultado de mais de um século de exploração, pelo que é necessário estudar não só as formações do Carbonífero, mas também as formações adjacentes de modo a compreender a interação entre elas.

A nível hidrogeológico, os limites geológicos e tectónicos da BCD correspondem aos limites hidrogeológicos, circunscrevendo a unidade da seguinte forma:

- O limite SO é definido pela discordância angular em inconformidade com os depósitos a muro da BCD (normalmente com a brecha de base) sobre os terrenos do Complexo xisto-grauváquico (CXG), que apresentam uma permeabilidade reduzida;
- O limite NE é definido pela falha inversa, a qual permite que as camadas do Paleozoico Inferior (Ordovício, Silúrico e Devónico), que caracterizam o flanco inverso do Anticlinal de Valongo, cavalguem as camadas do Carbonífero.

A intersecção dos limites, provocada pelos trabalhos mineiros, pela subsidência dos terrenos e pela presença de um sistema de falhas com orientação transversal relativamente às formações e às quebras de subsidência, permite um aumento significativo das taxas de infiltração da água de precipitação em todas as unidades hidrogeológicas (Chaminé et al. 2004) e a interligação com as formações adjacentes. Esta situação acarreta diversos problemas hidrogeológicos, nomeadamente, inundações em travessas ou galerias (Arrais 1988) e/ou possível contaminação das águas subterrâneas (Santos 2008). Trata-se de um maciço muito complexo e heterogêneo,

em que cada uma das litologias presentes tem características hidráulicas específicas (ECD 1995; Santos 2008). As características topográficas e geológicas dos jazigos de carvão existentes na BCD, bem como os diferentes métodos de lavra adotados ao longo do tempo e os processos de subsidência ocorridos, condicionam o regime de circulação e de armazenamento das águas superficiais e subterrâneas do maciço rochoso. A área do Couto Mineiro do Pejão é, à data, a única onde foram sintetizadas as características hidrogeológicas das formações presentes.

As unidades geológicas que ocorrem na área afetada pelos trabalhos mineiros, devido ao seu desenvolvimento, à sua litologia e aos seus limites tectônicos, podem ser consideradas, sob o ponto de vista hidrogeológico, como três unidades igualmente independentes e homólogas das unidades geológicas (como nos trabalhos de: Arrais 1988; Lippman e Weissenbach 1988; Mello Mendes e Dinis da Gama 1988; ECD 1995; Curi e Silva 1998; Santos 1998; Pedrosa 1999; Pedrosa et al. 2000; Chaminé et al. 2004; Santos 2008).

3.2. Unidade Hidrogeológica do CXG (Precâmbrico e/ou Câmbrio Inferior)

A unidade hidrogeológica do CXG pode ser considerada como a mais homogênea e impermeável e a menos produtiva de todas as unidades presentes. Esta unidade de natureza essencialmente xistosa, apresenta à superfície uma importante formação argilosa de alteração, impermeável, que leva a que a água da chuva drene à superfície do respetivo afloramento, sem permitir infiltrações significativas.

3.3. Unidade Hidrogeológica do Ordovícico

Nos terrenos do Ordovícico, é inevitável distinguir duas litologias distintas. Uma delas é formada por quartzitos, enquanto que a outra é constituída por xistos ardosíferos. Esta separação é importante, visto que estas litologias apresentam diferentes competências e, consequentemente, distintos comportamentos geomecânicos e hidrogeológicos.

3.3.1. Subunidade Rochas Quartzíticas

Esta subunidade é constituída por rochas quartzíticas (por vezes maciças) e conglomerados (muito silicificados), com intercalações de quartzitos xistóides. De uma forma geral, estas rochas de natureza quartzítica apresentam um comportamento hidrogeológico muito distinto das litologias pelíticas, a teto.

Os quartzitos revelam-se muito produtivos devido à sua elevada permeabilidade, induzida pela fraturação, e à comunicação hidráulica com o rio Douro, o rio Arda e outras linhas de água de menor importância. Os dados obtidos durante o funcionamento da mina permitiram verificar que a recarga deste aquífero é, essencialmente, efetuada por infiltração da água da chuva (Arrais 1988).

3.3.2. Subunidade Rochas Xistentas

Esta subunidade é constituída por rochas xistentas, as quais se encontram a teto das litologias quartzíticas, de cor acinzentada e, por vezes, ardosíferas. Quando identificada à superfície, a respetiva zona de alteração é pequena, não formando qualquer capa argilosa de cobertura significativa que proteja a entrada de água da chuva. Apresenta, ainda, descontinuidades abertas, que conferem uma elevada anisotropia à sua permeabilidade.

A recarga de águas pluviais ocorre nas zonas de descontinuidades abertas, que se encontram dispostas paralelamente à xistosidade e aos possíveis planos de falha. A anisotropia da permeabilidade é, geralmente, baixa, uma vez que a percolação dos fluidos ocorre preferencialmente nas descontinuidades mais abertas (Lippman e Weissenbach 1988). Os autores sugerem a possibilidade de a “Subunidade Rochas Xistentas” existir, apenas, até à profundidade do 3.º Piso da mina. De facto, estudos efetuados na frente da travessa 406 (4.º Piso da mina) sugerem a presença de níveis quartzo-quartzíticos (“Subunidade Rochas Quartzíticas”) na zona de contacto entre o Carbonífero e o Ordovício (Arrais 1988).

3.4. Unidade Hidrogeológica do Carbonífero

As formações carboníferas, quando não são identificadas nas minas, apresentam, geralmente, permeabilidade baixa e são consideradas como não aquíferas. O movimento das águas subterrâneas fica, assim, largamente restrito aos fluxos preferenciais em fraturas e fissuras.

A exploração do carvão, associada aos processos de rebaixamento dos níveis de água e subsidência, provoca alterações fundamentais na hidrologia e na hidroquímica das águas. Numa mina de carvão abandonada, o fluxo subterrâneo ocorre, principalmente, ao longo dos vazios da mina e dos estratos que colapsaram devido à subsidência. Por conseguinte, a conceptualização dos trabalhos mineiros inundados deve ser realizada como se de reservatórios interligados discretamente se tratassem, embora, de uma maneira geral, estejam apenas separados por um discreto fluxo em excesso (Chen et al. 1999).

Nesta unidade, é possível distinguir dois tipos litológicos com diferentes características hidrogeológicas: rochas de natureza conglomerática e arenítica (por vezes, brechóide) e rochas laminadas (argilosas, carbonosas e carvão). Estas últimas encontram-se muito tectonizadas, sob a forma de dobras e falhas, apresentando, por isso, permeabilidade baixa, pelo que não existem condições propícias para a formação de aquíferos. No entanto, à superfície, existem descontinuidades relativamente abertas, que podem permitir a entrada de águas pluviais. A ocorrência de água na Unidade Hidrogeológica do Carbonífero deve-se, principalmente, à existência de trabalhos mineiros antigos e dos respetivos aluimentos. O estudo efetuado pela ECD (1995) refere que a água que se infiltra nesta unidade, para além das águas pluviais, tem origem, também, na unidade dos quartzitos ordovícicos, situados a teto das camadas de carvão. Estes últimos constituem um meio propício à comunicação com a rede fluvial vizinha.

A precipitação é responsável pela maior parte da água que entra nesta unidade hidrogeológica, tanto pela ausência de terrenos impermeáveis na cobertura, como pela existência de rochas fraturadas nas camadas sobrejacentes. A formação de quebras de subsidência à superfície contribui para um aumento significativo da infiltração. Este facto foi comprovado pelo controlo efetuado da precipitação, dos caudais extraídos e dos níveis do rio Douro (Lippman e Weissenbach 1998; Arrais 1988). De facto, o estudo da precipitação mostrou que as variações dos afluxos de água à mina no 1.º Piso eram análogas às oscilações da precipitação, com um atraso de uma semana. Esta influência esbate-se nos pisos inferiores de tal modo que, no 3.º Piso, as oscilações do caudal já não eram tão evidentes (Arrais 1988).

4. PRODUTIVIDADE AQUÍFERA

Os quartzitos são, entre as unidades hidrogeológicas presentes, as que apresentam a maior produtividade aquífera na área. Estudos dos afluxos de água à mina de Germunde permitiram estimar os caudais desta subunidade hidrogeológica, os quais são superiores a 2,7 L/s (Mello Mendes e Dinis da Gama 1988).

Na Unidade Hidrogeológica do CXG existem, pelo menos, dois níveis de aquíferos. A informação disponibilizada pelos proprietários dos furos indica que, aquando da sua execução, o primeiro nível situava-se entre os 14 m e os 28 m de profundidade e o segundo nível entre os 40 m e 50 m. Os furos monitorizados nesta unidade, uma vez que, por norma, captam todos os níveis aquíferos encontrados durante a perfuração, apresentam caudais próximos dos 2 L/s. Na área de Pedorido, existem várias nascentes junto à zona do contacto com o Ordovícico (encosta a NW). Na maior parte das nascentes, foram construídas galerias com vista a aumentar o caudal captado. No entanto, estas nascentes são pouco produtivas e secam no pico do verão. Os caudais registados foram sempre inferiores a 1 L/s.

A unidade hidrogeológica do Carbonífero apresenta uma produtividade aquífera da ordem dos 0,5 L/s a 1 L/s, segundo os registos bibliográficos dos afluxos de água ao interior da mina durante a sua laboração.

A água dos sistemas aquíferos desta região sai principalmente por:

- Extração de água bombeada em furos e poços;
- Nascentes e minas de água (nascentes de água onde foram construídas galerias) existentes na área;
- Descarga da mina.

Não foi possível contabilizar a água extraída através de furos e poços. No entanto, como a água é utilizada essencialmente na rega, esta água volta a entrar no ciclo hidrológico, pelo que as perdas podem ser consideradas pouco significativas.

Santos (2008) monitorizou, ao longo de um ano, o caudal da principal descarga mineira,

localizada junto às antigas instalações de Germunde (nível 35). O caudal de saída, à boca da descarga, apresentou pequenas oscilações que variavam, aproximadamente, entre 2,7 L/s e 3,0 L/s. Estes caudais, superiores à produtividade aquífera da unidade do Carbonífero, sugeriam que a mina inundada continuava a receber influxos laterais do Ordovícico, que permitiam manter o seu caudal constante. Assim, estima-se que, por ano, a descarga mineira fornece ao Rio Douro, volumes de água compreendidos entre os 87708,3 m³ (em anos secos) e os 104068,8 m³ (em anos húmidos). A estação hidrométrica de Rio Mau (R07G/03H) do INAG (situada, aproximadamente, a 2 km a montante da mina de Germunde) registou, para o período compreendido entre 1976 e 1984, valores de escoamento anual do rio Douro entre 8129240 dam³ e 23137007 dam³. Deste modo, a descarga da mina contribui com uma percentagem de água inferior a 0,001% para o aumento do volume de água no rio Douro.

5. PIEZOMETRIA

Em 2008, realizaram-se estudos de variação piezométrica (Santos 2008), os quais salientaram a necessidade de se ter algumas reservas na interpretação deste tipo de dados, uma vez que:

- Não existem dados sobre a execução dos furos/poços monitorizados; assim, nestas circunstâncias, o valor medido numa determinada captação corresponde a um valor médio dos níveis individuais nesse furo/poço;
- Não foi possível averiguar, com exatidão, a que período de repouso na bombagem correspondia um determinado nível. Raramente os proprietários dos furos têm conhecimento da relação entre o tempo de bombagem e o tempo de repouso;
- A selagem da boca dos furos não permite a entrada da sonda de medição de níveis.

Chaminé et al. (2004) previram que as alterações na piezometria provocadas pela laboração da mina, em 2004, já não se fariam sentir e que o nível piezométrico estaria estabilizado, o que foi comprovado no trabalho realizado por Santos (2008). Neste trabalho, foi efetuada uma avaliação do estado dos pontos do inventário das nascentes e dos furos afetados pela exploração mineira, elaborada pela ECD. Verificou-se que as captações que secaram durante a exploração mineira (como consequência do rebaixamento do nível aquífero e da subsidência) permaneceram nas mesmas condições, comprovando que o equilíbrio hidrodinâmico atingido após a desativação da mina é diferente do inicial. Muitos dos casos de inviabilização de captações poder-se-ão dever aos fenómenos de subsidência que provocaram a sua obstrução (Figura 2).

Também, em medições efetuadas em 2016, i.e., vinte e dois anos após o encerramento da mina, as variações encontradas na superfície piezométrica são sazonais, resultantes da recarga dos aquíferos. Nos estudos efetuados, foram observadas variações de 15 m na superfície piezométrica. A influência da precipitação é claramente visível nestas variações (Quadro 1).

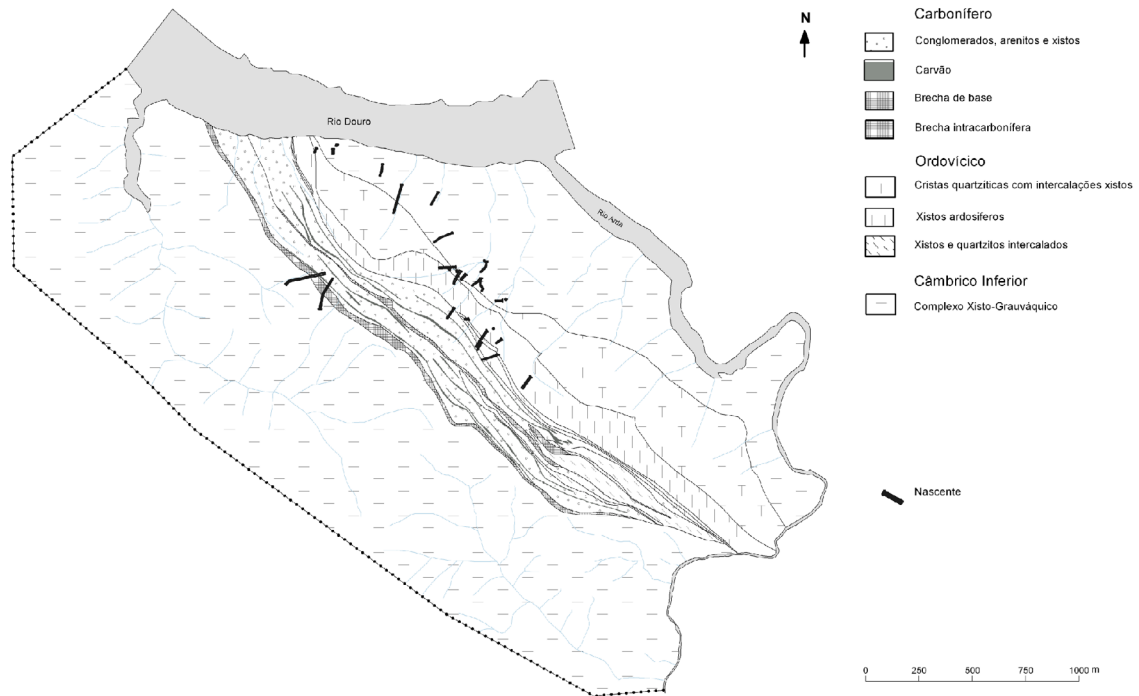


Figura 2 – Localização das captações que secaram durante a exploração mineira (adaptado de Santos 2008).

Quadro 1 – Níveis de água (máximos e mínimos) medidos durante a monitorização de campo para cada uma das litologias presentes no sector de Germunde (Santos 2008).

	F3	F14	F18 (Pz4)	F17 (PZ2)	F19 (PZ5)
Unidade Hidrogeológica	CXG a Sudoeste	CXG a Nordeste	Carbonífero	Carbonífero	Ordovícico (Quartzitos e xistos intercalados)
Máximo (m)	40,3	25,63	43,5*	46*	48,85*
Mínimo (m)	29,33	11,17	36,43	40,6	37,21
Máximo – Mínimo	10,97	14,46	7,07	6,6	11,64

* Profundidade abaixo da cota de fundo do furo

6. ESTIMATIVAS DA PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO MACIÇO ROCHOSO

Os maciços rochosos são heterogéneos e descontínuos a nível macro e microscópico, formados por rocha, por material intacto e por descontinuidades, que podem ser planos de estratificação, falhas, planos de xistosidade, fissuras, cavidades e grutas.

As descontinuidades abertas são os principais condutores de água, exceto em certos maciços sedimentares, onde a proporção de fluxo de água através da rocha pode ser significativa. As fraturas têm, de um modo geral, uma permeabilidade mais elevada do que a matriz rochosa.

Geralmente, a água circula pelo maciço através do seu sistema de fraturas, sob a ação dos gradientes hidráulicos, em condições que se revelam fortemente dependentes das características geométricas das fraturas, incluindo o próprio regime de escoamento. Como resultado, a maioria das propriedades físicas dos maciços rochosos depende do ponto escolhido (heterogeneidade), da direção considerada para a sua determinação (anisotropia) e das dimensões dos volumes envolvidos nos ensaios (efeito de escala).

A execução de uma obra ou de uma abertura subterrânea (como no caso das minas) introduz uma perturbação no maciço rochoso fraturado, provocando uma variação nas condições de escoamento e no estado de tensão. Estes dois fenómenos encontram-se estritamente interligados. Como é facilmente dedutível, a modificação das condições de escoamento num maciço rochoso provoca uma alteração nas ações geomecânicas, que, por sua vez, são responsáveis pela transformação do estado de tensão. Deste modo, são produzidas deformações que vão causar modificações na permeabilidade do maciço e, conseqüentemente, nas condições de escoamento.

A ECD (1995) efetuou algumas tentativas para calcular a permeabilidade dos materiais constituintes da mina de Germunde. Para o cálculo da condutividade hidráulica dos diversos materiais, foram realizadas diversas estimativas com base:

- No estudo das curvas de pluviosidade da região e dos caudais afluentes aos diversos pisos da mina elaborado pelo departamento técnico da mina de Germunde;
- Nos valores de referências bibliográficas;
- Nos resultados dos ensaios de permeabilidade realizados em 1985 pela empresa de sondagens e fundações Teixeira Duarte (Teixeira Duarte 1985).

Para estudar o comportamento hidromecânico do maciço, foi utilizado um Modelo Contínuo com base na lei de Darcy. A escolha deste modelo teve em conta que a circulação das águas na mina corre em manto contínuo, com uma espessura que varia entre os 150 m e 200 m e que a fonte de alimentação provém da água das chuvas, não havendo infiltrações significativas das formações envolventes, que não foram perturbadas pela exploração mineira (ECD 1995), isto é, um meio contínuo equivalente (meio contínuo poroso isotrópico) que corresponde ao estado real.

O departamento técnico da mina de Germunde, através do estudo das curvas de pluviosidade da região e dos caudais afluentes aos diversos pisos da mina, calculou os seguintes valores de gradientes hidráulicos: 0,07 para a secção longitudinal e 1 para a secção transversal. A partir destes valores, foi possível concluir que a permeabilidade equivalente vertical está condicionada à permeabilidade da Unidade Hidrogeológica do Carbonífero fraturado, enquanto que as permeabilidades equivalentes horizontal e longitudinal poderão estar mais condicionadas à

permeabilidade da Unidade Hidrogeológica do Ordovícico (xisto fraturado) (ECD 1995).

A combinação destes dados com os anteriormente mencionados permitiu à ECD obter os valores médios das condutividades hidráulicas dos materiais constituintes da região de Germunde (Quadro 2).

Quadro 2 – Valores médios das condutividades hidráulicas estimados pela ECD (1995).

Unidade		Valor médio (m/dia)
Ordovício (xisto)	Não fraturado	0,1
	Fraturado	10,0
Carbonífero	Não fraturado	0,07
	Fraturado	3,0

No entanto, no caso do maciço rochoso de Germunde, o meio é fraturado, logo descontínuo e anisotrópico, onde a comunicação hidráulica é reduzida, a permeabilidade é direcional e as fraturas são as condutas preferenciais para o escoamento subterrâneo. Por conseguinte, estes valores têm de ser usados com as devidas precauções. A Figura 3 apresenta o perfil hidrogeológico esquemático.

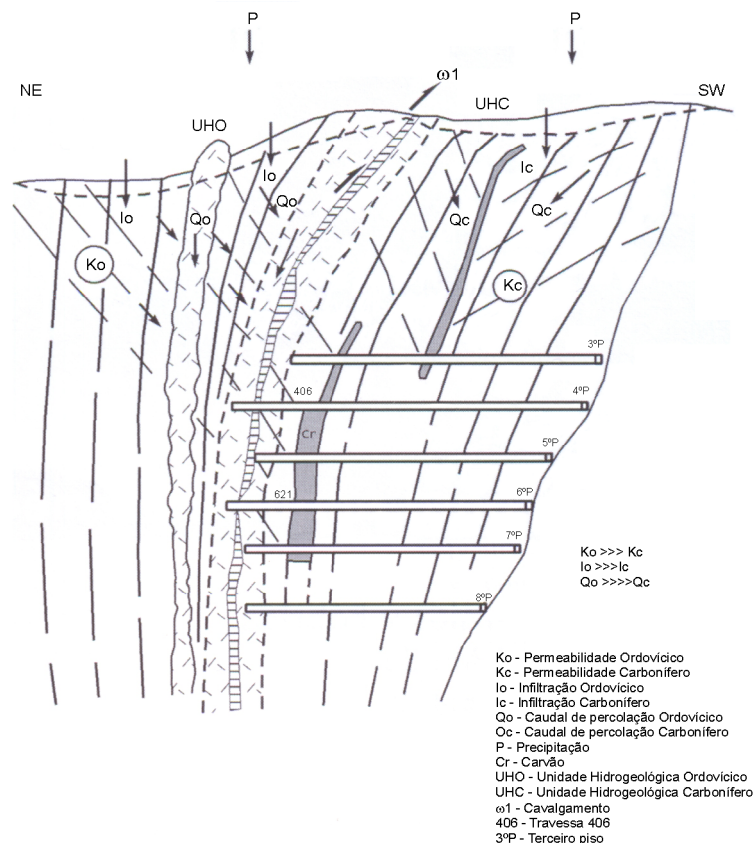


Figura 3 – Perfil hidrogeológico esquemático do maciço de Germunde (Chaminé et al. 2004; Arrais 1988).

7. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

7.1. Geral

Tal como nos estudos anteriores, os estudos de caracterização da qualidade da água na BCD são escassos. Os trabalhos mais completos concentram-se no Couto Mineiro do Pejão.

No caso do Couto Mineiro de São Pedro da Cova, não foi encontrado nenhum trabalho hidroquímico de pormenor. A maioria dos trabalhos consiste numa caracterização pontual de alguns parâmetros, não permitindo uma análise aprofundada dos processos hidroquímicos que poderão estar a ocorrer nas águas.

Teixeira (2012) caracterizou os parâmetros de campo de duas drenagens de galerias de mina em São Pedro da Cova. Os valores de campo de pH, condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (TDS = *Total Dissolved Solids*) e ferro (Fe) evidenciam a existência de drenagem mineira (Quadro 3). O mesmo acontece com as águas de drenagem de galerias, recolhidas por Silva (2013). Neste trabalho, a análise química das águas deteta que a carga metálica é representada pelo ferro, manganês e zinco, elementos estes que se encontram associados à existência de drenagem mineira (Quadro 3).

Quadro 3 – Parâmetros físico-químicos obtidos por Teixeira (2012) e Silva (2013) nas galerias de drenagem localizadas na mina de São Pedro da Cova.

AUTOR	Local	Data	pH campo	CE campo	TDS (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
Teixeira 2012	Galeria São Pedro Cova	19/06/2012	6,4	1070	530	17,8		
Teixeira 2012	Galeria São Pedro Cova	19/06/2012	6,5	1090	540	22,6		
Silva 2013	Galeria n. 1 São Pedro Cova	14/11/2012	5,6	1105		65,1 ± 0,6		0,085 ± 0,007
Silva 2013	Galeria n. 2 São Pedro Cova	14/11/2012	5,7	888		52,1 ± 0,5		0,068 ± 0,007
Silva 2013	Galeria n. 1 São Pedro Cova	05/02/2013	5,6	943		55,5 ± 0,5	3,7 ± 0,2	0,136 ± 0,007
Silva 2013	Galeria n. 2 São Pedro Cova	05/02/2013	5,6	918		49,1 ± 0,5	3,9 ± 0,2	0,125 ± 0,007

CE – Condutividade elétrica (mS/cm); TDS – Sólidos dissolvidos totais (mg/L).

O Couto Mineiro do Pejão, em 1998, foi alvo de um estudo hidrogeológico preliminar (Canto Machado 1999; Pedrosa et al. 2000). Este estudo abrangeu os diferentes sectores hidrogeológicos do Couto Mineiro (Lomba, Germunde-Arda, Arda-Pejão), concluindo que:

- A contaminação de origem mineira nas águas subterrâneas ao longo da faixa explorada entre a Lomba e o Pejão é generalizada, embora mais acentuada nos locais das antigas minas;
- Foi detetado um excesso de manganês no esgoto de todas as minas, verificando-se, ainda a presença excessiva de outros metais, à exceção da mina do Ervedal, cujo efluente hídrico apenas apresenta valores elevados de manganês;
- As águas provenientes da circulação subterrânea das minas da Lomba e de Germunde apresentam a pior qualidade química, com pH baixo, condutividade alta, valores elevados de sulfato e magnésio, bem como de vários metais pesados;
- Os metais cuja presença excessiva é mais frequente são o manganês, o ferro e o zinco aos quais se junta o alumínio em Germunde e na Lomba. A contaminação por níquel, berílio e ítrio é mais insistente em Germunde, que se revela como sendo o local com piores condições, relativamente à contaminação por metais;
- O aquífero livre superficial encontra-se em boas condições, conforme demonstrado pelas águas das nascentes amostradas. Isto permitiu inferir que as águas mais contaminadas são as captadas nos aquíferos semi-confinados, abaixo do nível livre superficial;
- A conjugação dos dados analíticos com as profundidades de exploração permitiu concluir que a mina de Germunde, com uma profundidade de 600 m, tem o maior impacto sobre as águas subterrâneas.

7.2. A mina de Germunde

A mina de Germunde foi a última mina do CMP a encerrar. Foi a mina que beneficiou de uma investigação hidrogeológica mais aprofundada, dado localizar-se junto ao rio Douro, bem como pelo facto de a exploração subterrânea ter ocorrido a grande profundidade. Além disso, a mudança de políticas e consciência ambiental no final do século XX levou a que fossem realizados estudos complementares, de modo a prevenir ou minimizar casos de contaminação mineira.

A partir da compilação bibliográfica dos diferentes estudos realizados (ECD 1995; Santos 1998; Pedrosa et al. 2000; Santos 2008), foi possível recolher dados sobre as captações existentes. Os trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de averiguar a contaminação mineira nas áreas envolventes aos coutos mineiros e, por isso, houve a preocupação de recolher o máximo de informação possível sobre as áreas possivelmente afetadas, bem como sobre locais onde, provavelmente, não se observava poluição, de modo a servir de referência padrão para o carácter químico da água. Devido à interação águas superficiais/águas subterrâneas num meio hidrogeológico fraturado, a maioria dos estudos consultados incluem a monitorização de pontos de água superficiais e de formações adjacentes à BCD.

Antes do encerramento da mina, foram realizados trabalhos de caracterização prévia da qualidade das águas da mina (ECD 1995). Estas análises químicas limitaram-se ao estudo dos

elementos maiores e dos parâmetros físico-químicos básicos. Todavia, uma vez que este estudo implicou a caracterização dos inúmeros pisos, foi possível verificar a existência de variações de fácies hidroquímicas entre os pisos da mina, o que ajudou no estudo das fontes de recarga de água aquando da sua inundação.

Os dados químicos obtidos por Santos (1998), Pedrosa et al. (2000) e Santos (2008) encontram-se resumidos nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Estatística das análises químicas efetuadas a elementos maiores por tipo de captação de água.

		Furos		Escombreira		Descargas mineiras		Nascentes	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
pH		3,5	7,1	2,8	4,1	2,9	4,1	5,4	6,7
EC	μS/cm	102,6	478,0	2500,0	11000,0	717,0	3410,0	57,0	237,0
Resíduo seco	mg/L	57,4	386,8	3289,8	6519,6	337,2	5150,0	4,5	6,8
SO ₄ ²⁻	mg/L	4,3	188,9	2334,5	13744,0	232,7	2564,0	5,8	85,5
Cl ⁻	mg/L	14,2	52,3	5,3	41,5	18,5	50,5	10,9	24,4
HCO ₃ ⁻	mg/L	0,0	195,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	50,0
F ⁻	mg/L	0,0	0,5	0,0	10,8	0,0	5,1	0,0	0,7
NO ₃ ⁻	mg/L	0,0	35,3	0,0	26,3	0,0	22,0	0,5	8,9
Mg ²⁺	mg/L	3,5	32,1	161,7	1915,0	14,5	325,0	2,0	14,4
Ca ⁺	mg/L	0,8	38,2	112,2	345,0	0,8	247,0	0,5	13,2
Na ⁺	mg/L	7,4	29,5	9,3	21,8	12,0	30,0	6,2	16,7
K ⁺	mg/L	0,4	5,0	0,5	1,6	1,1	11,1	0,2	2,1
Si	mg/L	4,4	25,7	10,2	20,7	6,5	16,1	6,1	7,7

EC – condutividade elétrica.

Analisando o Quadro 4, verifica-se que o sulfato e o magnésio são os constituintes maioritários, os quais apresentam uma maior divergência entre as suas concentrações mínima e máxima. O cálcio apresenta concentrações muito elevadas nas descargas mineiras e na escombreira da Serrinha. A concentração do hidrogenocarbonato apresenta um comportamento que varia em função do pH, isto é, à medida que o pH diminui, todo o hidrogenocarbonato é consumido. Os restantes elementos não são afetados pelas reações associadas à drenagem mineira. As concentrações de cloreto variam tipicamente entre 5 mg/L e 52,3 mg/L, o que sugere que a sua origem está associada à precipitação de sais concentrados por evapotranspiração. O sódio apresenta concentrações mais elevadas nas águas de furos e na descarga da mina inundada (M1), sugerindo que a sua origem está associada a processos de interação água/minerais silicatados. Os valores do nitrato são sempre inferiores ao máximo recomendado pela diretiva. A maior concentração (35,3 mg/L) foi observada num furo situado numa zona agrícola. Esta observação está em conformidade com outros trabalhos (Banks

Quadro 5 – Estatística das análises químicas efetuadas a elementos menores e vestigiais por tipo de captação de água.

		Furos			Escombreira		Descargas mineiras		Nascentes	
		L.D.	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Al	µg/L	2,00	4,0	11100,0	101000,0	859000,0	347,0	17800,0	58,0	932,0
Fe	µg/L	5,00	0	25900,0	5020,0	97000,0	336,0	314000,0	12,0	1120,0
Mn	µg/L	0,05	46,0	1920,0	26900,0	200000,0	1740,0	36800,0	5,0	1660,0
Zn	µg/L	0,50	8,0	6960,0	2990,0	30600,0	182,0	2600,0	21,0	390,0
Ni	µg/L	0,20	0,4	700,0	1,2	7600,0	155,0	191000,0	3,0	148,0
Co	µg/L	0,01	0,0	208,0	991,0	7200,0	74,6	1100,0	2,0	106,0
Li	µg/L	0,10	8,0	78,0	629,0	4000,0	96,0	430,0	19,0	89,0
Y	µg/L	0,003	0,0	9,3	325,0	1600,0	8,1	65,0	0,6	2,5
Cu	µg/L	0,10	0,8	816,0	1,2	1020,0	0,0	111,0	1,0	44,1
Sr	µg/L	0,04	10,0	211,0	251,0	713,0	42,2	428,0	5,0	77,4
Be	µg/L	0,05	0,1	8,0	46,5	338,0	2,7	35,0	0,2	3,0
Cd	µg/L	0,01	0,0	352,0	8,5	91,0	0,1	8,0	0,3	1,3
Cr	µg/L	0,50	0,0	0,6	3,8	8,2	2,3	4,4	1,1	1,1
As	µg/L	0,03	0,0	10,8	1,6	3,3	0,2	22,0	0,3	6,0

et al. 1997a), que demonstram que as descargas da mina de carvão não contribuem para a poluição das águas com nitrato.

Em resumo, ao analisar a componente maioritária das águas, é possível observar que as águas contaminadas por atividades mineiras apresentam uma alteração de fácies hidroquímica. A fácies regional cloretada sódica ou bicarbonatada cálcica transforma-se, no local da antiga exploração mineira, em fácies sulfatada magnesiânica ou cálcica. À medida que se afasta do foco contaminante, as águas passam, sucessivamente, por várias gradações intermédias, verificadas tanto na composição catiónica como na aniónica.

A variabilidade dos elementos menores e vestigiais é muito grande, chegando a existir diferenças até 6 ordens de grandeza entre o valor máximo e o mínimo (Quadro 5).

A carga metálica muito elevada faz-se sentir principalmente nas drenagens da mina e da escombreira, estando presentes os metais ferro, alumínio, manganês, zinco, cobre, cádmio, cobalto, berílio e ítrio com concentrações que, por vezes, atingem as dezenas de mg/L. No entanto, a diminuição desta componente metálica é rápida.

Nas águas subterrâneas, verifica-se que, por vezes, os furos exibem uma carga metálica bastante significativa, tornando em alguns destes poços as respetivas águas impróprias para consumo humano.

O alumínio, o ferro e o manganês apresentam um comportamento geoquímico similar, exceto no que se refere às concentrações de alumínio na descarga do nível 20, dado que este metal tem um comportamento diferente dos restantes em condições de pH superiores a 4,5. Nestes valores

de pH, o alumínio torna-se pouco solúvel, deixando de ser um componente problemático na drenagem mineira (Hedin et al. 1994).

As elevadas concentrações de lítio presentes podem ser justificadas por reações de troca iónica entre minerais, nas quais o lítio é menos adsorvido do que outros elementos comuns. Por conseguinte, é plausível que, quando este entra em solução através de reações de dissolução, continue no estado dissolvido (Hem 1985).

Segundo Younger et al. (2002), o zinco pode ser utilizado como um indicador de processos de drenagem mineira, dado ser um elemento com grande mobilidade.

8. ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA QUALIDADE QUÍMICA DAS ÁGUAS NA MINA DE GERMUNDE

Como os métodos tradicionais de estudos hidroquímicos não se coadjuvam ao conhecimento da evolução temporal das águas, Santos (2008) aplicou métodos estatísticos para estudar a variação espacial e temporal dos locais amostrados, no sector Germunde-Arda.

A aplicação de métodos estatísticos multivariados como a “Análise de Componentes Principais” (ACP), segundo a metodologia definida por Santos (2008), permitiu distinguir os principais processos hidrogeoquímicos em curso na área de Germunde. A separação em diferentes grupos de amostras permitiu:

- A identificação de variações hidroquímicas dentro do grupo de amostras;
- A identificação de águas não contaminadas e de águas contaminadas;
- A identificação dos elementos químicos associados à drenagem mineira;
- A visualização de variações temporais e espaciais das características hidroquímicas das águas.

A projeção dos resultados das matrizes obtidas, no plano fatorial, permite a interpretação do primeiro eixo fatorial como estando relacionado com a contaminação mineira.

A projeção das variáveis no 1.º plano fatorial, obtida pela aplicação da ACP, segundo a metodologia descrita, permitiu, numa 1.ª fase, identificar as variáveis que se encontram relacionadas com a contaminação mineira (Figura 4).

A projeção das amostras, neste plano fatorial, permite inferir, qualitativamente, o grau de contaminação de cada uma das amostras: quanto mais próxima do lado negativo do eixo fatorial se encontra a amostra, maior será o seu nível de contaminação (Figura 5).

A Figura 5 representa a projeção das amostras no primeiro plano fatorial. É possível separar as amostras em três grupos, tendo em conta a sua posição no 1.º eixo: (1) a descarga da escombreira, (2) as descargas da mina e (3) um terceiro grupo formado pelos furos, nascentes, rios. Verifica-se, também, que, ao longo do tempo e tendo em conta o significado do 1.º eixo fatorial, a escombreira da mina apresenta uma melhoria significativa entre 1998 e 2004. De facto, as amostragens realizadas em 2003 e 2004 aproximam-se da origem do eixo.

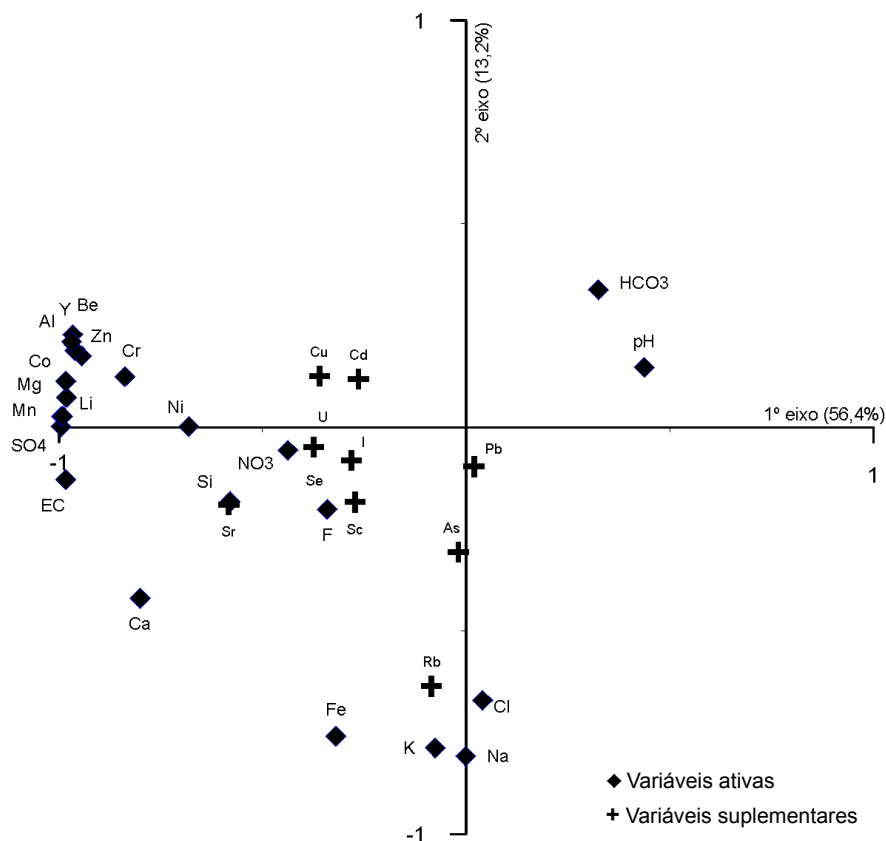


Figura 4 – Projeção das variáveis ativas e das variáveis suplementares no 1.º plano fatorial (Santos 2008).

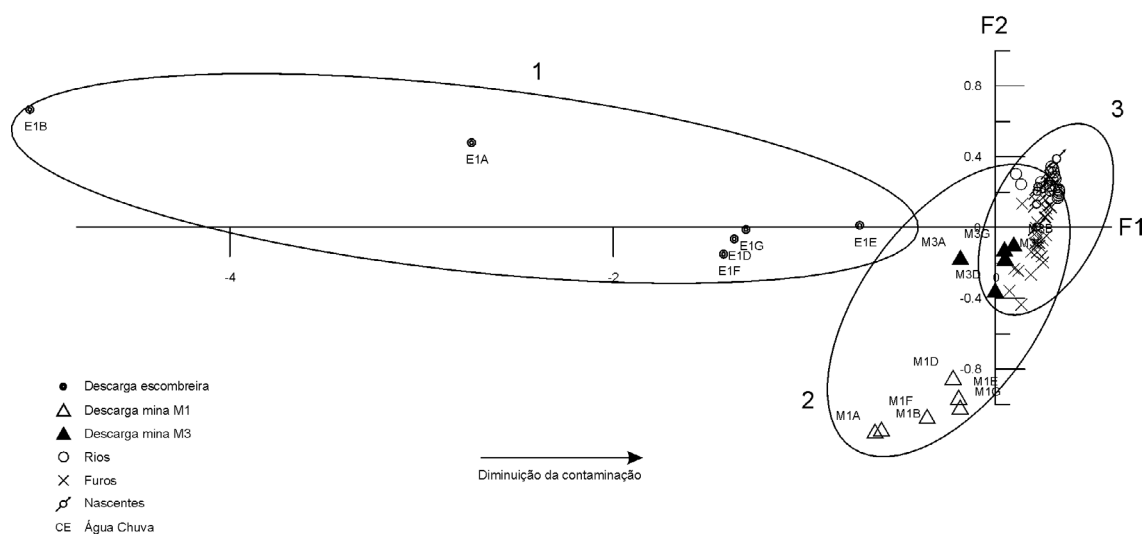


Figura 5 – Distribuição das diferentes amostras de água no 1.º plano fatorial para a matriz inicial (Santos 2008).

A projeção dos resultados médios obtidos para cada local no mapa da área dos diferentes subconjuntos, através da metodologia já referida (Santos 2008), permite constatar que a aplicação desta metodologia melhorou significativamente a interpretação dos resultados (Figuras 6 e 7). Ao comparar as figuras, é possível observar um refinamento dos resultados, o qual permite distinguir de forma significativa as águas pertencentes ao subconjunto do fundo geoquímico, pelo que:

- Amostras de água da mesma litologia apresentam valores distintos no 1º fator, isto é, têm diferentes composições químicas. Daqui se conclui que a litologia não é um parâmetro que, nestas condições, influencie o tipo de água;
- A presença de falhas, por si só, também não o é, uma vez que pontos de amostragem localizados sobre falhas e na mesma litologia apresentam composições diferentes. Assim, as falhas apenas são um fator determinante para a propagação da contaminação, quando existe comunicação hidráulica entre o interior da mina e o ponto de amostragem.

No rio Douro, não foi detetada qualquer modificação significativa da composição química da água, após a descarga do nível 20 da mina, devido à precipitação de vários oxihidróxidos antes da entrada de água no rio Douro e ao seu grande caudal, que dilui rapidamente a contaminação. O mesmo se passa no rio Arda, que é a linha de água mais importante na área envolvente e que é a recetora das águas da escombreira. Perto da confluência, já não são detetados índices relevantes de contaminação mineira.

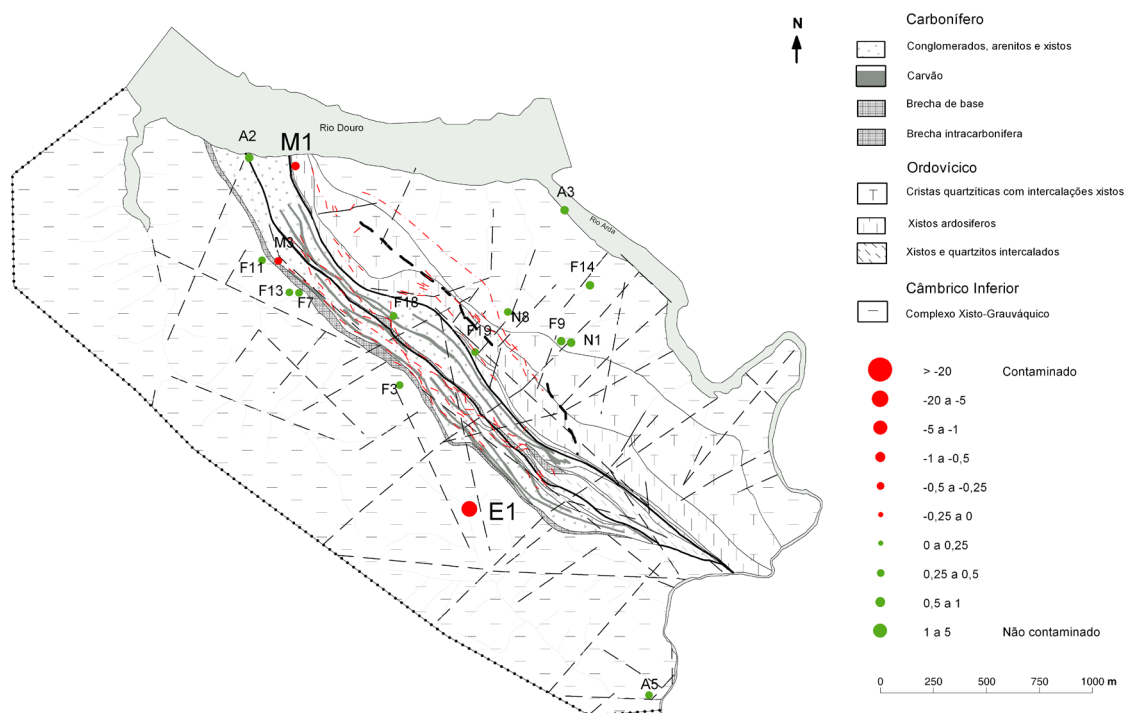


Figura 6 – Projeção dos valores médios do 1.º fator resultante da aplicação da ACP à matriz completa (Santos 2008).

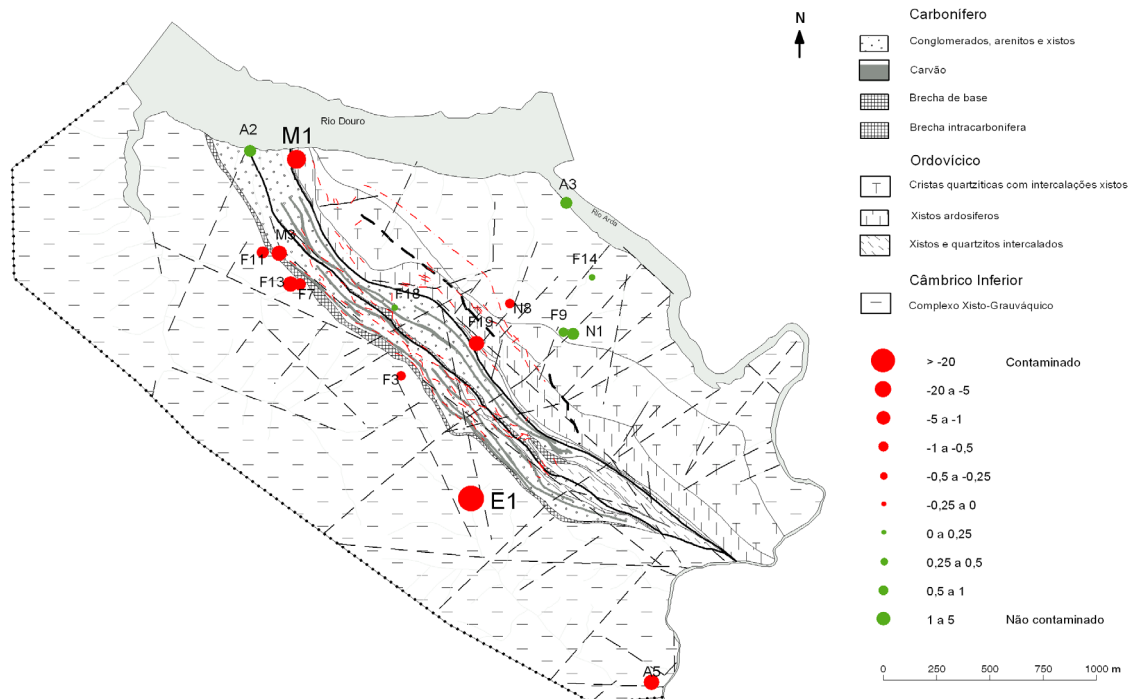


Figura 7 – Projeção dos valores médios do 1.º fator resultante da aplicação da ACP após a separação ótima dos subconjuntos (Santos 2008).

9. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

Com o encerramento da mina e a sua posterior inundação, deixou de ser possível o acesso às suas galerias subterrâneas. A impossibilidade da observação direta do que acontece no seu interior, obriga a utilização de métodos indiretos como, por exemplo, os métodos geofísicos eletromagnéticos.

Na tentativa de melhorar o conhecimento das estruturas geológicas e do interior da mina, bem como do modo como se efetua a circulação de águas na mina de Germunde, foram escolhidos os métodos *Radiofrequency-Electromagnetics* (RF-EM) e *Radiomagnetotelluric-Resistivity* (RMT-R). Estes métodos utilizam, como fonte de energia, ondas de rádio de baixa a muito baixa frequência, na banda dos 12 kHz aos 300 kHz, emitidas por antenas muito potentes existentes no globo terrestre. A profundidade de penetração das ondas no subsolo depende da frequência (F) do emissor (em hertz) e da resistividade (ρ) das litologias presentes. Ambos os aparelhos de medição que foram utilizados são protótipos desenvolvidos e concebidos pelo Professor Imré Müller e J. Duperex (Centro de Hidrogeologia da Universidade de Neuchâtel). Uma descrição completa destes dispositivos, bem como os princípios destes métodos, pode ser encontrada na tese de doutoramento de Turberg (1994). Exemplos de aplicação destes métodos em estudos hidrogeológicos e de contaminação mineira em Portugal podem ser encontrados em Carvalho Dill et al. (1998), Turberg e Müller (1992), Santos e Carvalho Dill (2003), Santos (2008), Carvalho Dill et al. (2009) e Santos et al. (2010).

No Couto Mineiro do Pejão, Santos (2008) utilizou estes métodos no sector de Germunde-Arda com o intuito de detetar anomalias no sinal obtido que, de alguma forma, indicam os caminhos de escoamento preferenciais da água subterrânea, assim como:

- obter uma melhor visualização da geometria e da estrutura no interior do aquífero;
- delimitar zonas de contaminação;
- relacionar a geologia e a estrutura da mina com o sinal obtido.

Para se chegar a uma interpretação correta dos resultados, é necessária a sua validação. No caso descrito, os dados geofísicos foram integrados num sistema de informação geográfica (SIG) dimensional, juntamente com os perfis geológicos, plantas da mina e demais bibliografia existente. De seguida, cada sondagem e cada perfil eletromagnético foram confrontados com o conhecimento da estrutura da mina e da geologia.

A aplicação conjunta dos dois métodos permitiu complementar os dados obtidos, uma vez que o método RF-EM se mostrou mais eficaz na caracterização e distinção dos sistemas de falhas e fraturas, enquanto que o método RMT-R se mostrou mais sensível na cartografia das variações litológicas do local, tanto à superfície como em profundidade.

O trabalho de geofísica realizado por Santos (2008) permitiu:

- Identificar contactos geológicos em profundidade (fator muito importante, dado tratar-se de uma área com camadas muito inclinadas);
- Identificar e determinar a orientação de falhas, através da visualização tridimensional dos perfis em ambiente SIG;
- Delimitar zonas de subsidência;
- Delimitar solos contaminados nos locais das escombreyras;
- Reconhecer, especificamente, padrões de fluxo dos lixiviados da escombreyra na Xeira, com direção SO-NE, isto é, das Unidades Hidrogeológicas do Carbonífero para o Ordovícico. Tal facto permitiu inferir que a “barreira hidrogeológica”, definida entre estas duas unidades pelo cavalgamento, é quebrada pela presença de falhas e fraturas. Com efeito, estas quebras podem originar vias preferenciais ao longo dos quais pode ocorrer a contaminação das águas do Ordovícico, não sendo, no entanto, possível quantificar o respetivo grau de contaminação;
- Delimitar uma área onde foi realizado o desmonte de carvão pelo método de enchimento e, posteriormente, preenchida com material de maior resistividade elétrica (proveniente da brecha de base);
- Identificar galerias de mina em profundidade, através do efeito indutor que aquelas provocam no sinal obtido pelo método.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hidrogeologia da BCD está intimamente relacionada com a hidrogeologia mineira. A herança de minas abandonadas na Europa, incluindo Portugal, constitui um passivo ambiental com impactos negativos na qualidade das águas. O estudo da drenagem mineira necessita de uma abordagem multidisciplinar, dado que esta é influenciada por vários fatores.

A monitorização química das águas é essencial para a caracterização e avaliação da contaminação das águas subterrâneas.

As variações sazonais do nível freático influenciam a qualidade da água dos furos e das nascentes, mediante processos de remobilização dos metais retidos no solo, ou por infiltração de águas residuais. No caso do CMP, foram, contudo, identificados casos com gravidade analiticamente comprovada. A avaliar pelos resultados obtidos, as águas superficiais apresentam-se menos severamente contaminadas do que as subterrâneas, provavelmente devido às condições físico-químicas e hidrodinâmicas existentes. No entanto, a qualidade destas últimas é fortemente afetada pela interferência de diferentes mecanismos. Não se pode, porém, deixar de sublinhar o importante papel desempenhado pela tectónica (falhas, diáclases, fissuras) ao condicionar, por vezes de forma acentuada, a direção e a intensidade do fluxo nos aquíferos em profundidade.

A estatística multivariada (Análise de Componentes Principais – ACP) é uma ferramenta muito útil para estudar a correlação entre o grau de contaminação observado na área de estudo e a hidroquímica.

A projeção espacial dos valores fatoriais no mapa geológico permite inferir que, nas condições atuais (a presença de uma mina em profundidade), a litologia não é um parâmetro que influencia o tipo de água presente. Além disso, esta projeção permite identificar as fraturas que estabelecem comunicação hidráulica entre o interior da mina e os pontos de amostragem, expondo assim áreas com um risco potencial quer para o ambiente quer para as pessoas.

A partir dos resultados obtidos no estudo hidroquímico, verificou-se que:

- As águas que não apresentam qualquer tipo de contaminação surgem, ao longo do tempo, com fácies cloretadas sódicas ou bicarbonatadas cálcicas;
- As águas que apresentam algum contacto com zonas contaminadas apresentam variações de fácies ao longo das diferentes amostragens;
- A carga metálica mais elevada surge, principalmente, nas drenagens da mina e da escombreira com os metais como o ferro, o alumínio, o manganês, o zinco, o cobre, o cádmio, o cobalto, o berílio, o ítrio. Por vezes, atingem concentrações de dezenas de mg/L.

No entanto, a diminuição desta componente metálica é rápida.

Quanto aos resultados obtidos, verificou-se que as concentrações de metais pesados, embora adquiram pontualmente alguma expressão quantitativa nas águas, não parecem constituir um fator de preocupação muito sério em termos de risco ambiental, até porque a utilização do solo e da água pelas populações autóctones, sob influência direta da mina, é limitada.

As melhorias verificadas na escombreira da Serrinha e na descarga da mina inundada (M1), entre a primeira amostragem, realizada em 1998, e as amostragens realizadas em 2003 e 2004, demonstram que estão a ocorrer processos de atenuação natural. No entanto, devido às características físico-químicas ainda existentes, em ambos os locais, a monitorização da atenuação natural não pode ser encarada como uma solução única, sendo necessário tomar medidas adicionais que ajudem a minimizar o impacto negativo da contaminação.

A aplicação de métodos geofísicos revelou ser uma ferramenta muito útil para complementar a interpretação e o reconhecimento de áreas contaminadas em maciços fraturados.

Todas as áreas científicas abordadas estão ainda longe de serem completamente compreendidas, pelo que deverão ser desenvolvidos trabalhos futuros para a aquisição de novos dados.

Atualmente, continua a ser necessária uma investigação aprofundada de todas as áreas da BCD, de modo a compreender o comportamento hidrogeológico local e regional desta grande estrutura.

REFERÊNCIAS

- Arrais, C.M., 1988. *Afluxos de água à mina. Execução de uma travessa-galeria para drenagem de águas da travessa*. Empresa Carbonífera do Douro, 406p.
- Banks, D., 1997. Hydrogeochemistry of Millstone Grit and Coal Measures groundwaters, south Yorkshire and north Derbyshire, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 30(3): 237-256.
- Banks, D., 2004. Geochemical processes controlling minewater pollution. In: *Groundwater Management in Mining Areas. Proceedings of the 2nd IMAGE-TRAIN, Advanced Study Course*. Editado por Gundula Prokop, Paul Youger e Karl E. Roehl. Vienna: Umweltbundesamt, pp. 17-44.
- Banks, D., Burke, S.P., e Gray, C.G., 1997a. Hydrogeochemistry of coal mine drainage and other ferruginous waters in north Derbyshire and south Yorkshire, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 30(3): 257-280.
- Banks, D., Younger, P.L., Arnesen, R.T., Iversen, E.R., e Banks, S.B., 1997b. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. *Environmental Geology* 32(3): 157-174.
- Canto Machado, M.J., 1999. *Hidroquímica dos metais pesados na Mina do Pejão*. Porto: Arquivos do Instituto Geológico Mineiro (IGM), 9p.+anexos.
- Carvalho Dill, A., Müller, I., Marques da Costa, A., e Monteiro, J.P., 1998. *Importância do uso de métodos geofísicos electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e radio magnetotelluric-Resistivity (RMT-R) no estudo de Aquíferos Cárlicos do Alentejo e do Algarve*. Lisboa: Actas do 4.º Congresso da Água, 10p.
- Carvalho Dill, A.M.M., Turberg, P., Müller, I., e Parriaux, A., 2009. The combined use of Radio-Frequency Electromagnetics (RF-EM) and Radiomagnetotellurics (RMT) methods in non ideal field conditions for delineating hydrogeological boundaries for environmental problems. *Environmental Earth Sciences* 56(6): 1071-1091.
- Chaminé, H.I., Arrais, C.M., Pinto de Jesus, A., Silva, P.B., Gomes, A.A., Teixeira, J., e Dinis da Gama, C., 2004. Afluxos de água na antiga mina de carvão de Germunde (sector Oliveira do Arda-Folgoso, NW de Portugal): constrangimentos geotectónicos, morfoestruturais e hidrogeomecânicos. *Tecnologia da Água*, Edição II, pp. 28-41.
- Chen, M., Soulsby, C., e Younger, P.L., 1999. Modelling the evolution of minewater pollution at Polkemmet Colliery, Almond catchment, Scotland. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 32(4): 351-362.

- Collon, P., 2003. *Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages, 216p. (Tese de Doutorado).
- Cravotta III, C.A., 2008. Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 1: Constituent quantities and correlations. *Applied Geochemistry* 23(2): 166-202.
- Cravotta, C.A., Goode, D.J., Bartles, M.D., Risser, D.W., e Galeone, D.G., 2014. Surface water and groundwater interactions in an extensively mined watershed, upper Schuylkill River, Pennsylvania, USA. *Hydrological Processes* 28(10): 3574-3601.
- Cunha, D.E.M.M., 2013. *Estudo da Contaminação de Solos por Exploração Mineira em S. Pedro da Cova*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Ciências e Tecnologia do Ambiente, 125p. (Tese de Mestrado).
- Curi, A., e Silva, J.M., 1998. Comportamento Hidrodinâmico de Meios Fracturados (Formulação de um Modelo Hidrogeológico): Estudo de um caso em Mineração. *A Água em Revista* 10: 4-8.
- Custódio, J., 2004. *Museu do Carvão e das Minas do Pejão: programa museológico*. Castelo de Paiva: Câmara Municipal de Castelo de Paiva. (Documento não editado).
- Dinis da Gama, C., 2000. Geotecnica ambiental - perspectivas e aplicações: XVI Lição Manuel Rocha, 1999. *Geotecnia* 90: 5-50.
- Dinis da Gama, C., e Arrais, C., 1996. Recuperação ambiental e paisagística da escombreira da Serrinha anexa à mina de Carvão de Germunde. *Boletim de Minas* 33(1): 21-37.
- ECD (Empresa Carbonífera do Douro S.A.), 1995. *Investigação sobre os trabalhos superficiais e subterrâneos para minimizar os efeitos da subsidência de minas de carvão com camadas sub-verticais*. Comissão das Comunidades Europeias, Direcção Geral Energia-DGXVII, Investigação Tecnológica do Carvão, Convenção N.º 7220/AF/001. Pendorido, Relatório final, 229p.
- Gleisner, M., 2005. *Quantification of mineral weathering rates in sulfidic mine tailings under water-saturated conditions*. Department of Geology and Geochemistry, Stockholm University, 29p.
- Gonçalves, E.J.S., 2013. *Hidrogeologia das áreas de Valongo, de Paredes e de Arouca, no contexto do Anticlinal de Valongo*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, 355p. (Tese de Doutorado).
- Hedin, R.S., Narin, R.W., e Kleinmann, R.L.P., 1994. *Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Information Circular 9389, 35p.
- Hem, J.D., 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. USGS science for a changing world, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, Third Edition, 263p.
- Holmes, P.R., e Crundwell, F.K., 2000. The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: an electrochemical study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64(2): 263-274.
- Johnson, D.B., e Hallberg, K.B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of The Total Environment* 338(1-2): 3-14.
- Lambert, D.C., McDonough, K.M., e Dzombak, D.A., 2004. Long-term changes in quality of discharge water from abandoned underground coal mines in Uniontown Syncline, Fayette County, PA, USA. *Water Research* 38(2): 277-288.
- Lippman, F., e Weissenbach, N., 1988. *Underground Water influx and surface movements close to the Douro River at the coal mine Pejão (Portugal)*. Result of seminar in January and February 1998. Grundstofftechnik GmbH. West Germany, Essen., 81p. (Relatório técnico inédito).
- López Pamo, E., Aduvire, O., e Baretino, D., 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Mineiro* 113(1): 3-21.

- Mello Mendes, F., e Dinis da Gama, C., 1988. *Acompanhamento Geomecânico da exploração da mina de Germunde*. Instituto Superior Técnico, Empresa Carbonífera do Douro S.A., Relatórios Julho/Agosto, 14p. (Relatório inédito).
- Nicholson, R.V., 1994. Iron-sulfide oxidation mechanisms: laboratory studies. *Environmental Geochemistry of Sulphide Mine-Wastes* 22: 163-183.
- Nordstrom, D.K., e Southam, G., 1997. Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation, Reviews in Mineralogy. In: *Geomicrobiology: Interactions between microbes and minerals*. Editado por J.F. Banfield e K.H. Nealson. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America 35(11): 361-390.
- Pedrosa, M.Y., 1999. *Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica de Portugal, à escala 1/200000. Folha 1*. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro, 70p.
- Pedrosa, M.Y., Machado, M.J., e Santos, R., 2000. Hidrogeologia do Couto Mineiro do Pejão. Notas preliminares. In: *Jornadas hispano-lusas sobre las aguas subterráneas en el noroeste de la Península Ibérica*. Editado por J. Samper, T. Leitão, L. Fernández e L. Ribeiro. A Coruña: AIH-GE & APRH, pp. 467-473.
- Peiffer, S., e Stubert, I., 1999. The oxidation of pyrite at pH7 in the presence of reducing and nonreducing Fe(III)-chelators. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(19-20): 3171-3182.
- Rees, S.B., Bowell, R.J., e Wiseman, I., 2002. Influence of mine hydrogeology on mine water discharge chemistry. In: *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*. Editado por P.L. Younger e N.S. Robins. Geological Society, London, Special Publications 198: 379-390.
- Ribeiro, J., e Flores, D., 2008. Caracterização multidisciplinar da escombreira da Serrinha (Bacia Carbonífera do Douro) – implicações ambientais. In: *V Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, CD-ROM, pp. 79-86.
- Ribeiro, J., Ferreira da Silva, E., Pinto de Jesus, A., e Flores, D., 2011. Petrographic and geochemical characterization of coal waste piles from Douro Coalfield (NW Portugal). *International Journal of Coal Geology* 87(3-4): 226-236.
- Ribeiro, J., Jesus, A.D.P., e Flores, D., 2010. Petrografia e geoquímica orgânica das escombreiras de carvão da Bacia Carbonífera do Douro – implicações ambientais. *e-Terra, Revista Eletrónica de Ciências da Terra, Geosciences On-line Journal* 9(12): 1-4.
- Rimstidt, J.D., e Vaughan, D.J., 2003. Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(5): 873-880.
- Rose, A.W., e Cravotta III, C.A., 1998. Geochemistry of Coal Mine Drainage. In: *Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania*. Editado por B.C.K. Brady, W.M. Smith e J. Schueck. The Pennsylvania Department of Environmental Protection 1: 1.1-1.22.
- Santos Oliveira, J.M., e Ávila, P.F., 1999. *Estudo geoquímico da área da mina do Pejão numa perspectiva ambiental*. Instituto Geológico e Mineiro, Arquivo IGM, Porto, 15p.+anexos.
- Santos Oliveira, J.M., Farinha, J., Matos, J.X., Ávila, P., Rosa, C.J.P., Canto Machado M.J., Daniel, F.S., Martins, L., e Machado Leite, M.R., 2002. Diagnóstico Ambiental das Principais Áreas Mineiras Degradadas do País. *Boletim de Minas* 39(2): 67-85.
- Santos Oliveira, J.M., Machado Leite, M.R., Canto Machado, M.J., e Pedrosa, M.Y., 2000. Auréolas de dispersão química causadas pela actividade mineira. Estratégias e uma metodologia técnico-Científica com vista à sua avaliação e hierarquização. *Boletim de Minas* 37: 177-185.
- Santos, P.C.R., 2013. *Estudo da Suscetibilidade Magnética nos Solos da Extração Mineira de São Pedro da Cova*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, 140p. (Tese de Mestrado).
- Santos, R., 1998. *Estudo hidrogeológico e hidroquímico da área envolvente do Couto Mineiro do Pejão*. Dados preliminares. Relatório de Estágio Profissionalizante. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto/ Instituto Geológico e Mineiro, 139p.+7anexos. (Relatório inédito).

- Santos, R., 2008. *Caracterização Hidrogeológica e Hidrogeoquímica da Área Mineira de Germunde, Pejão*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 212p. (Tese de Doutoramento).
- Santos, R., e Carvalho Dill, A., 2003. Aplicação do método geofísico RF-EM (Radiofrequency-Electromagnetics) na área envolvente da mina de Germunde. Interpretação de resultados. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, n.º especial, CD-ROM, pp. D84-D87.
- Santos, R., Carvalho Dill, A., e Müller, I., 2010. Vantagens do uso de métodos electromagnéticos no diagnóstico de problemas ambientais gerados por minas abandonadas. A mina de Germunde. *e-Terra – VIII Congresso Nacional de Geologia* 101: 1-4.
- Santos, R., Carvalho Dill, A., Ribeiro, L., e Canto Machado, M.J., 2004. Hydrochemistry evolution in Germunde Coal Mine. Preliminary results. In: *32nd International Geological Congress*. Florence, pp. 452-453.
- Santos, R., Ribeiro, L. e Carvalho Dill, A., 2005. The use of multivariate statistical analysis to evaluate spatial and temporal water contamination in Germunde coal mine (Portugal). In: *9th International Mine Water Association Congress*. Editado por J.P. Loredó. Proceedings of the 9th International Mine Water Association Congress, Oviedo, pp. 439-450.
- Silva, D.A.A., 2013. *Estudo da Contaminação de Águas pela Extração Mineira de Carvão em São Pedro da Cova*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, 88p. (Tese de Mestrado).
- Singer, P.C., e Stumm, W., 1970. Acid Mine Drainage: The Rate-Determining Step. *Science* 167(3921): 1121-1123.
- Strömberg, B., e Banwart, S., 1994. Kinetic modelling of geochemical processes at the Aitik mining waste rock site in northern Sweden. *Applied Geochemistry* 9(5): 583-595.
- Stumm, W., e Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. New York: John Wiley & Sons, 3ª Edição, 1040p.
- Sullivan, P.J., e Yelton, J.L., 1988. An evaluation of trace elements release associated with acid mine drainage. *Environmental Geology and Water Sciences* 12(3): 181-186.
- Teixeira Duarte, 1985. *Mina de Germunde – infiltração de águas do rio Douro. Reconhecimento geotécnico*. Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte Lda. (Relatório).
- Teixeira, S.R.M., 2012. *Biorremediação de um efluente mineiro por Lemna minor*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 71p. (Tese de Mestrado).
- Turberg, P., 1994. *Apport de la cartographie radiomagnetotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés*. Université de Neuchâtel, 132p. (Tese de Doutoramento).
- Turberg, P., e Müller, I., 1992. La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissuré. In: *Cinquième Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire et en Milieu Fissuré*. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Mémoire Hors de Série 11: 207-214.
- Vila, T., Ribeiro, J., Garcia, C., Algarra, M., e Flores, D., 2010. *Avaliação do potencial de contaminação por elementos tóxicos e compostos orgânicos na escombreira da Lomba (Bacia Carbonífera do Douro)*. Actas X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa/XVI Semana de Geoquímica, CD, pp. 413-419.
- Wiersma, C.L., e Rimstidt, J.D., 1984. Rates of reaction of pyrite and marcasite with ferric iron at pH 2. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48(1): 85-92.
- Williams, D.J., Bigham, J.M., Cravotta III, C.A., Traina, S.J., Anderson, J.E., e Lyon, J.G., 2002. Assessing mine drainage pH from the color and spectral reflectance of chemical precipitates. *Applied Geochemistry* 17(10): 1273-1286.
- Younger, P.L., 1997. The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. *Science of The Total Environment* 194/195: 457-466.
- Younger, P.L., 2000a. Holistic remedial strategies for short- and long-term water pollution from abandoned mine. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A. *Mining Technology* 109(3): A210-A218.

- Younger, P.L., 2000b. Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation. *Journal of Contaminant Hydrology* 44(1): 47-69.
- Younger, P.L., e Wolkersdorfer, C., 2004. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. *Mine Water and the Environment* 23: s2-s80.
- Younger, P.L., Banwart, S.A., e Hedin, R.S., 2002. *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Environmental pollution, Springer Science + Business Media Dordrecht, 442p.

Escombreyras em autocombustão na Bacia Carbonífera do Douro: Processos, impactes ambientais e monitorização

DEOLINDA FLORES^{1,*}, ANA CLÁUDIA TEODORO¹, ARMINDO MELO², CATARINA MANSILHA², DUARTE VIVEIROS³, JOANA RIBEIRO⁴, JOÃO FERREIRA³, JORGE ESPINHA MARQUES¹, JOSÉ LUÍS SANTOS^{3,5}, JOSÉ MANUEL BATISTA^{3,6}, LIA DUARTE¹ E PATRÍCIA SANTOS¹

¹ Instituto de Ciências da Terra – Polo da Universidade do Porto e Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

² Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, Porto e REQUIMTE, Universidade do Porto

³ INESC TEC – Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência

⁴ Universidade de Coimbra, Instituto Dom Luiz, Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia

⁵ Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

⁶ Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia da Universidade da Madeira

* E-mail: dflores@fc.up.pt

RESUMO

A autocombustão de carvão pode ocorrer em camadas aflorantes, durante as atividades de exploração mineira, durante o armazenamento e transporte de carvão, bem como em depósitos de resíduos resultantes da exploração. A autocombustão de carvão causa a mobilização de poluentes, sob a forma de matéria particulada e gases, constituídos por compostos orgânicos e/ou elementos tóxicos, que podem ser emitidos, libertados ou lixiviados, para os solos, águas e atmosfera do ambiente envolvente. A atividade mineira na Bacia Carbonífera do Douro causa impactes no ambiente devido, entre outros, à autocombustão de escombreyras, cuja ignição foi causada por incêndios rurais que ocorreram em 2005 e 2017. A caracterização dos materiais que constituem estas escombreyras assim como a caracterização e quantificação dos impactes ambientais causados pela sua autocombustão, incluindo os impactes, nos solos e nas águas da área envolvente, permitiu a identificação de compostos orgânicos e elementos inorgânicos que podem ser perigosos para os ecossistemas e para o ambiente. A monitorização da temperatura associada à autocombustão foi realizada através de diferentes técnicas/abordagens, com base em sensores de fibra óptica, e por técnicas de deteção remota, recorrendo a veículos aéreos não tripulados (VANT), contribuindo para a previsão da dinâmica da autocombustão, assim como para a previsão de cenários evolutivos. A quantificação de contaminantes nos solos e nas águas, a análise da sua distribuição espacial e a definição da extensão da contaminação através da aplicação de algoritmos geoestatísticos e da exploração dos dados geoespaciais permitiram a caracterização dos riscos ambientais, essenciais para a definição de medidas apropriadas de mitigação e recuperação.

⁺ Com exceção do primeiro autor, todos os outros estão ordenados por ordem alfabética, uma vez que contribuíram de igual modo para a elaboração deste trabalho, assim como para a execução dos projetos.

[†] Docente da Universidade da Madeira e investigador do INESC TEC, pessoa com ação crucial no estabelecimento e desenvolvimento do projeto ECOAL-MGT. Faleceu a 7 de dezembro de 2023.

Palavras-chave: Bacia Carbonífera do Douro, Resíduos mineiros de carvão, Autocombustão, Risco ambiental, Monitorização

ABSTRACT

Coal related fires can occur in un-mined outcrops, during coal mining, during storage and transportation of coal, and in coal waste piles. The self-burning of coal mobilizes contaminants, as particulate matter, and gases, composed of organic compounds and/or toxic trace elements, which may be emitted, released, or leached to soils, waters and atmosphere of the surrounding environment. The past mining activity in the Douro Coalfield impacted the environment due to, among others, the self-burning, whose ignition was caused by forest fires that occurred in 2005 and 2017. The characterization of the materials that constitute these coal wastes as well as the characterization and quantification of the environmental impacts caused by their self-burning, including impacts on soils and waters of the surrounding area, allowed the identification of organic compounds and inorganic elements that can be dangerous for ecosystems and the environment. The monitoring of the temperature associated to self-burning was carried out through technological tools, based on optical fiber sensors, and by remote sensing techniques, using an unmanned aerial vehicle (UAV) contributing to the prediction of the dynamics of the self-burning coal waste deposits as well as to the prediction of evolutionary scenarios. The quantification of contaminants in soils and water, the analysis of its spatial distribution and the definition of the extent of pollution, through the application of geostatistical algorithms and the exploration of geospatial data, allowed the characterization of environmental risks, essential for the definition of appropriate measures for mitigation and recovery.

Key-words: Douro Coalfield, coal mining residues, self-burning, environmental risks, monitoring

Lista de Abreviaturas

BCD – Bacia Carbonífera do Douro

BOTDA – *Brillouin Optical Time-Domain Analysis*

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro

EPT – Elementos Potencialmente Tóxicos

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)

HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

IC – Índice de Contaminação

ICCP – International Committee for Coal and Organic Petrology

IDW – *Inverse Distance Weighting*

IQA – Índice de Qualidade da Água

IT – Índice de Toxicidade

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de vegetação de diferença normalizada)

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

VANT – Veículo aéreo não tripulado (UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*)

WMS – *Wavelength Modulation Spectroscopy* (Espectroscopia de modulação de comprimento de onda).

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Carbonífera do Douro (BCD) constitui a ocorrência do Carbonífero continental mais vasta de Portugal e estende-se desde São Pedro de Fins, na Maia, até Janarde, em Arouca, numa faixa com dimensões de aproximadamente 50 km de comprimento e um máximo de cerca de 500 m de largura (p. ex., Lemos de Sousa 1978; Wagner e Lemos de Sousa 1983; Pinto de Jesus 2003, 2019). A sequência sedimentar inclui camadas de carvão que foram exploradas durante décadas em várias minas, sendo os coutos mineiros mais relevantes os de São Pedro da Cova e do Pejão (p. ex., Lemos de Sousa 1978; Pinto de Jesus 2003, 2019). Como tal, são áreas muito estudadas do ponto de vista tectonoestratigráfico (p. ex., Domingos et al. 1983; Pinto de Jesus 2019), paleobotânico (p. ex., Wagner e Lemos de Sousa 1983; Correia et al. 2018), paleozoológico (p. ex., Eagar 1983; Loureiro et al. 2010), da petrologia orgânica e geoquímica dos carvões (p. ex., Lemos de Sousa 1973, 1978, 1979; Moura et al. 2018; Costa 2021; Costa et al. 2022;), e também dos impactes ambientais associados às escombreyras resultantes da sua exploração assim como dos solos circundantes (p. ex., Ribeiro 2011; Ribeiro et al. 2017; Teodoro et al. 2021; Santos et al. 2023a,b).

O carvão explorado na BCD foi utilizado como o principal combustível fóssil para a produção de energia, tendo a atividade mineira deixado um elevado volume de resíduos resultantes da sua exploração e beneficiação, os quais foram depositados em escombreyras próximas das minas, resultando em inúmeras escombreyras ao longo de toda a bacia. Este legado ambiental, na maioria dos casos sem qualquer recuperação e/ou manutenção, causa impactes no ambiente envolvente, o que foi agravado pela entrada em autocombustão das escombreyras de São Pedro da Cova, Midões e Lomba, no concelho de Gondomar, cuja ignição foi causada por incêndios rurais que ocorreram em 2005 e que, no caso da escombreyra de São Pedro da Cova, ainda hoje se mantém. Em 2017, na sequência dos grandes incêndios rurais, três escombreyras de carvão entraram em autocombustão na área mineira do Pejão, no concelho de Castelo de Paiva. Neste caso, foram implementadas pela Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM) medidas para extinguir a combustão, através da remobilização dos resíduos e da utilização de água misturada com um agente acelerador de arrefecimento.

Os materiais que constituem estas escombreyras, incluindo as que entraram em autocombustão

em 2005, foram alvo dos primeiros estudos através da tese de doutoramento de Joana Ribeiro (Ribeiro 2011), cujos resultados foram publicados (Ribeiro et al. 2010a,b, 2011). Na sequência destes trabalhos foram financiados os projetos ECOAL², que promoveu a monitorização da temperatura de combustão e dos gases libertados através de fibra óptica na escombreira de São Pedro da Cova (p.ex., Ribeiro et al. 2017) e *CoalMine*³, que estudou os efeitos nos solos na envolvente da escombreira (Santos et al. 2023a,b), os impactes hidropedológicos associados à exploração mineira (Espinha Marques et al. 2021; Mansilha et al. 2021) e a monitorização da temperatura de combustão e dos movimentos de massa por deteção remota (Duarte et al. 2022; Teodoro et al. 2021). Atualmente, está em desenvolvimento um outro projeto, SHS⁴, que estuda os efeitos do processo de extinção da combustão da escombreira do Fojo, recorrendo à remobilização dos resíduos utilizando água juntamente com um agente acelerador de arrefecimento. Nestes projetos, estiveram envolvidas equipas multidisciplinares das áreas das geociências, da física, da engenharia geográfica, da química e, no projeto mais recente (SHS), também da engenharia de minas, da sociologia e das belas-artes.

Neste contexto, pretende-se, neste trabalho, apresentar os dados obtidos no estudo das escombreiras que entraram em combustão em 2005, com particular ênfase nos trabalhos desenvolvidos na escombreira de São Pedro da Cova e nos seus efeitos nos solos e nas águas das áreas envolventes.

2. FATORES E PROCESSOS DA AUTOCOMBUSTÃO

A combustão do carvão pode ocorrer em ambiente natural em camadas aflorantes, em minas abandonadas, durante o armazenamento e transporte de carvão e em escombreiras resultantes da acumulação de rejeitados mineiros. Dependendo do seu grau de evolução, esta combustão pode ocorrer de modo espontâneo nos carvões ricos em matérias voláteis (carvões de baixo grau de acordo com a norma ISO 11760, 2018), designada por combustão espontânea, ou pode ser induzida por agentes externos. Neste sentido, as lignites e os carvões sub-betuminosos são os mais suscetíveis à combustão espontânea. A combustão em ambiente natural é um problema global grave: (i) do ponto de vista económico pois promove a alteração das suas propriedades, o consumo/perda de recursos e, ainda, os custos associados ao controlo da combustão; (ii) do ponto de vista de segurança com risco significativo na exploração mineira, no transporte e no armazenamento do carvão;

² ECOAL – MGT – SOE3/P2/P714, *Ecological Management of Coal Waste Piles in Combustion*, SUDOE – Interreg IV.

³ *CoalMine* – Resíduos de exploração de carvão: avaliação, monitorização e recuperação de impactos ambientais através de deteção remota e análise geoestatística Ref. POCI-01-0145-FEDER-030138, 02-SAICT-2017.

⁴ SHS – *Soil health surrounding former mining areas: characterization, risk analysis, and intervention*, NORTE-45-2020-75 – Sistema de Apoio à Investigação Científica e Tecnológica – “Projetos Estruturados de I&D&I” – HORIZONTE EUROPA, Ref. NORTE-01-0145-FEDER-000056.

(iii) do ponto de vista ambiental e de saúde humana, uma vez que durante este processo há a libertação de calor, de gases tóxicos e com efeito de estufa (CO , CO_2 , H_2S , SO_x , CH_4 , compostos orgânicos voláteis (COV), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e fenóis) e, também, de poeiras, consumindo, ainda, oxigénio. Na sua globalidade, estes efeitos provocam a degradação ambiental influenciando a qualidade do ar, provocando a contaminação dos solos e dos recursos hídricos, a instabilidade estrutural dos terrenos adjacentes e a destruição dos ecossistemas das áreas afetadas (p. ex., Finkelman 2004; Pone et al. 2007; Misz-Kennan e Fabiańska 2011; Suárez-Ruiz et al. 2012). Os incêndios resultantes da combustão espontânea do carvão são particularmente graves em países em desenvolvimento, como a China, a Índia e a África do Sul, onde as políticas e os recursos para a sua mitigação são escassos ou não prioritários (Pone et al. 2007; Avila et al. 2014).

A combustão espontânea ocorre quando a quantidade de calor gerada durante a oxidação da matéria orgânica (autoaquecimento) é maior do que a quantidade de calor dissipada. Uma vez que a taxa de geração de calor é uma função exponencial da temperatura e a taxa de perda de calor é uma função linear da temperatura, este processo causa instabilidade térmica e consequente autoignição. Por sua vez, a designação de autocombustão corresponde à combustão em ambiente natural com ignição induzida por uma causa interna (combustão espontânea) e/ou externa (p. ex., incêndios rurais, descargas elétricas de trovoadas).

Como em qualquer incêndio, a combustão em ambiente natural do carvão requer três elementos essenciais (Figura 1): combustível, que neste caso é o carbono presente no carvão, oxigénio do ar e uma fonte de ignição, que pode ser externa ou ocorrer por autoignição. O poder calorífico do carvão aumenta com o aumento do teor em carbono e por essa razão quanto maior for o grau de evolução do carvão maior será o seu poder calorífico.

Os fatores que promovem a combustão do carvão podem ser intrínsecos e/ou extrínsecos (Beamish e Arisoy 2008; Suárez-Ruiz e Crelling 2008; Mastalerz et al. 2011; Misz-Kennan e Fabiańska 2011; Suárez-Ruiz et al. 2012). A meteorização/oxidação do carvão, facilitada pela presença do oxigénio, é o fator intrínseco mais comum, sendo favorecido pela composição petrográfica, nomeadamente pela presença de macerais reativos, como a liptinite e a huminite/vitrinite; pelo grau de evolução do carvão, sendo os carvões de grau inferior, incluindo as lignites e os carvões sub-betuminosos,

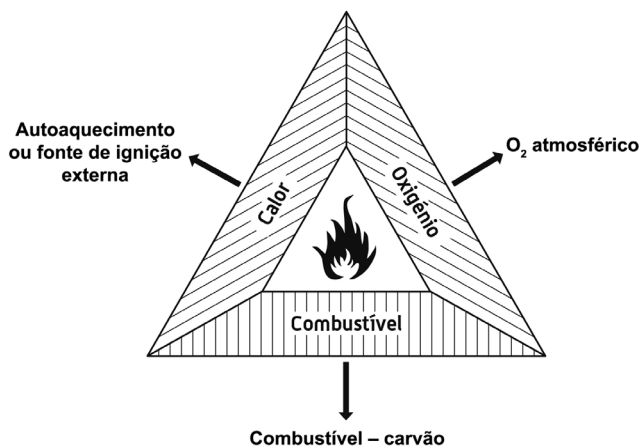


Figura 1 – Os três elementos essenciais para qualquer combustão: combustível, oxigénio e fonte de ignição (adaptado de Kim 2011).

mais suscetíveis à combustão espontânea, uma vez que apresentam, também, uma estrutura mais porosa aumentando a superfície interna disponível para a circulação e atuação do ar/oxigênio e da água; a composição dos parâmetros das análises imediata e elementar, nomeadamente o teor em humidade, o teor em matérias voláteis, os teores em carbono e em enxofre; e, ainda, o rendimento em cinzas, nomeadamente a fração inorgânica associada à matéria orgânica e sua mineralogia, uma vez que a oxidação da pirite, mineral frequente nos carvões, é uma reação exotérmica, promovendo, ainda, a génese de fissuras que facilitam a meteorização/oxidação da fração orgânica do carvão.

No entanto, os fatores extrínsecos associados à prática mineira (Suárez-Ruiz e Crelling 2008; Suárez--Ruiz et al. 2012), incêndios rurais e descargas atmosféricas (Gentzis e Goodarzi 1989; Stracher 2007) também são responsáveis pela ignição do carvão e das escomboreiras de rejeitados mineiros, mesmo os carvões de grau superior, tais como a antracite A da BCD (Ribeiro et al. 2010a). Também a adsorção de oxigênio na superfície do carvão com produção de calor (processo exotérmico), assim como a área de superfície das partículas expostas ao oxigênio, são fatores condicionantes (Avila et al. 2014).

A combustão do carvão em ambiente natural induz alterações quer na fração orgânica, quer na inorgânica dos carvões. No âmbito das atividades do International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), foi desenvolvida uma nomenclatura e uma classificação petrográfica para os morfotipos das partículas orgânicas afetadas termicamente (Misz-Kennan et al. 2020). Esta classificação inclui aspetos petrográficos da matéria orgânica afetada e não afetada termicamente, incluindo: (i) um aumento generalizado da refletância das partículas, acompanhado pela libertação de humidade e matérias voláteis, o desenvolvimento de porosidade onde a oxidação é controlada cineticamente, devido à porosidade interna, que aumenta a massa livre e de transporte de energia, permitindo a reação por toda a partícula (Avila et al. 2014); (ii) fissuras e microfraturas devidas a processos de expansão e contração térmicas; (iii) bordos de reação (com alteração da refletância nos bordos: refletância superior ou inferior ao carvão original), devido à fraca difusão de oxigênio, com a oxidação a concentrar-se nos bordos das partículas (Avila et al. 2014); (iv) vacúolos de desvolatilização, devido à libertação de matérias voláteis; (v) partículas com bordos arredondados, estruturas de coque, e partículas neoformadas como carbono pirolítico e *chars*⁵.

A matéria mineral sofre também modificações durante a autocombustão do carvão e dos resíduos mineiros de carvão, resultando em materiais/produtos com características semelhantes aos encontrados nas cinzas volantes resultantes da combustão do carvão nas centrais termoelétricas, tais como material amorfo, compostos de ferro, espinelas, polimorfos de sílica e minerais magnéticos (Ribeiro et al. 2015).

⁵ *Char* é o resíduo carbonoso que resulta do processo de desvolatilização (libertação dos gases) durante a pirólise do carvão. As partículas de *char* são caracterizadas por uma estrutura que apresenta fissuras e poros, cuja morfologia depende das condições de pirólise, da composição petrográfica e grau de evolução do carvão e da dimensão das partículas.

3. ESCOMBREIRAS EM AUTOCOMBUSTÃO NA BCD E IMPACTES AMBIENTAIS

Na BCD e nas imediações das minas onde o carvão foi explorado foram identificadas cerca de trinta escombreyras. Estas escombreyras de rejeitados mineiros, com dimensões, geometria e composição muito variável, representam um dos principais focos de preocupação ambiental, devido ao potencial de contaminação das áreas envolventes.

Como mencionado anteriormente, em 2005 e 2017, a deflagração de incêndios rurais causou a ignição de algumas escombreyras da BCD. Os incêndios que ocorreram em 2005 causaram a ignição de três escombreyras, nomeadamente, Lomba, Midões e São Pedro da Cova, estando esta última em autocombustão até aos dias de hoje. Estas escombreyras localizam-se no território do concelho de Gondomar (Porto). A escombreyra de São Pedro da Cova localiza-se nas imediações do Couto Mineiro de São Pedro da Cova e está inserida em meio urbano, perto de habitações e infraestruturas sociais e desportivas.

Na Figura 2 observa-se a localização do Couto Mineiro de São Pedro da Cova, a Norte do rio Douro, enquadrada na estrutura alongada da BCD. A imagem de satélite da Figura 2 mostra a localização e a dimensão da escombreyra de São Pedro da Cova, assim como a ocupação do território na área envolvente.

Na ausência de qualquer ação que possa parar o processo de combustão, o potencial destas escombreyras permanecerem em autocombustão durante períodos prolongados está relacionado

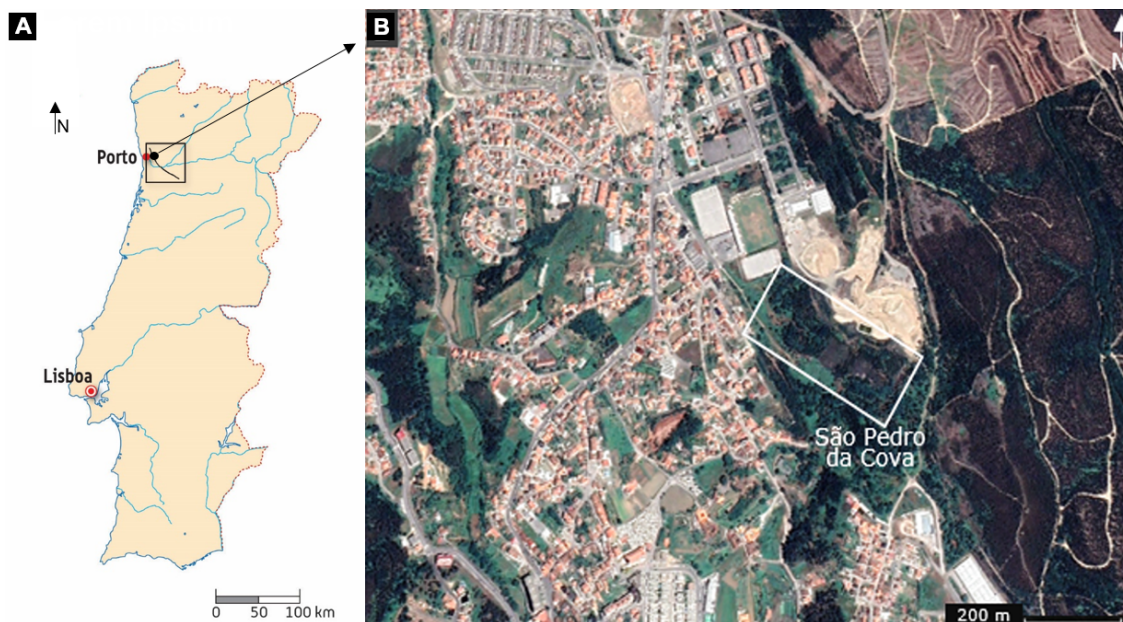


Figura 2 – (A) Localização do Couto Mineiro de São Pedro da Cova na BCD; (B) Localização da escombreyra de São Pedro da Cova e área envolvente (fonte: *GoogleEarth*).

com o material carbonoso incluído nos rejeitados mineiros (em quantidades variáveis nas diferentes escombreyras) que, em conjunto com o oxigénio atmosférico, sustenta a combustão.

O processo de autocombustão em escombreyras de carvão intensifica os impactes ambientais associados à deposição inadequada de resíduos mineiros, uma vez que a combustão a temperaturas elevadas causa alterações na composição química e mineralógica dos materiais, assim como a decomposição e a volatilização de espécies químicas orgânicas e inorgânicas.

A Figura 3 mostra as infraestruturas abandonadas da mina de São Pedro da Cova (Figura 3A), assim como uma visão abrangente da escombreyra (Figura 3B), onde se observam os efeitos da autocombustão.



Figura 3 – (A) Infraestruturas abandonadas da mina de São Pedro da Cova; (B) Escombreyra de São Pedro da Cova onde se observa a vegetação queimada e a coloração avermelhada do material nas áreas queimadas.

A caracterização integrada dos materiais que compõem as escombreyras sujeitas a autocombustão na BCD, assim como dos produtos resultantes do processo de combustão, nomeadamente gases e minerais neoformados, demonstra que os potenciais impactes ambientais associados a estas escombreyras compreendem:

- (i) a contaminação atmosférica causada pela emissão de gases e dispersão de partículas sólidas;
- (ii) a contaminação dos solos e das águas superficiais e subterrâneas causada pela mobilização de partículas sólidas e de componentes dissolvidos pela percolação de água, assim como pela drenagem ácida e pela dissolução de minerais neoformados que precipitam na superfície por sublimação;
- (iii) a instabilidade e os movimentos de terreno provocados pela perda de massa das escombreyras devido à combustão e também provocados pelos agentes de meteorização;
- (iv) a deterioração da vegetação, devida à combustão e à drenagem ácida.

Na Figura 4 pode observar-se a emissão de gases e a precipitação de enxofre na superfície da escombreyra de São Pedro da Cova. Estas emissões gasosas são compostas por uma complexa mistura de gases com efeito de estufa e de COV, que são prejudiciais aos seres vivos. Como minerais que precipitam na superfície das escombreyras em autocombustão na BCD identificaram-se o enxofre e o cloreto de amónio (sal amoníaco) (NH_4Cl), que solubilizam facilmente com a humidade



Figura 4 – Emissão de gases (A) e precipitação de enxofre (B) na superfície da escombreira de São Pedro da Cova.

atmosférica e a água da chuva, potenciando a produção de drenagem ácida nas áreas envolventes.

A estes impactes no ambiente associam-se preocupações relacionadas com a saúde humana, uma vez que estas escombreyras se localizam perto de centros habitacionais e de infraestruturas sociais e desportivas. Estas preocupações são particularmente relevantes em São Pedro da Cova, onde a combustão está ativa desde 2005, dando origem a uma exposição prolongada da população aos potenciais contaminantes. Os efeitos sobre a saúde humana estão, principalmente, relacionados com as emissões gasosas e a dispersão atmosférica de partículas sólidas. A contaminação dos solos e das águas pode afetar a biodiversidade e a saúde humana, nomeadamente através do consumo de água contaminada e da utilização dos solos para a agricultura.

4. ESPECIFICIDADES PETROGRÁFICAS, MINERALÓGICAS E GEOQUÍMICAS

A autocombustão de escombreyras da BCD tem sido investigada através da aplicação de um vasto conjunto de técnicas interdisciplinares com o objetivo de, entre outros, se identificar as alterações causadas nos resíduos mineiros. Essas alterações são evidentes no material das escombreyras durante observações de campo (Figura 5). Destas alterações destacam-se a coloração avermelhada dos materiais nas áreas já queimadas e em combustão ativa, e a emissão de gases na área em combustão. Nas áreas não queimadas, o material das escombreyras é cinzento escuro a negro e observam-se evidências de pedogénese (Figura 5B).

A recolha de amostras e os estudos laboratoriais revelaram que os materiais sujeitos à combustão sofreram alterações significativas nas composições petrográfica, mineralógica e geoquímica, que consequentemente causaram alterações no modo de ocorrência dos elementos químicos e nos impactes ambientais associados.

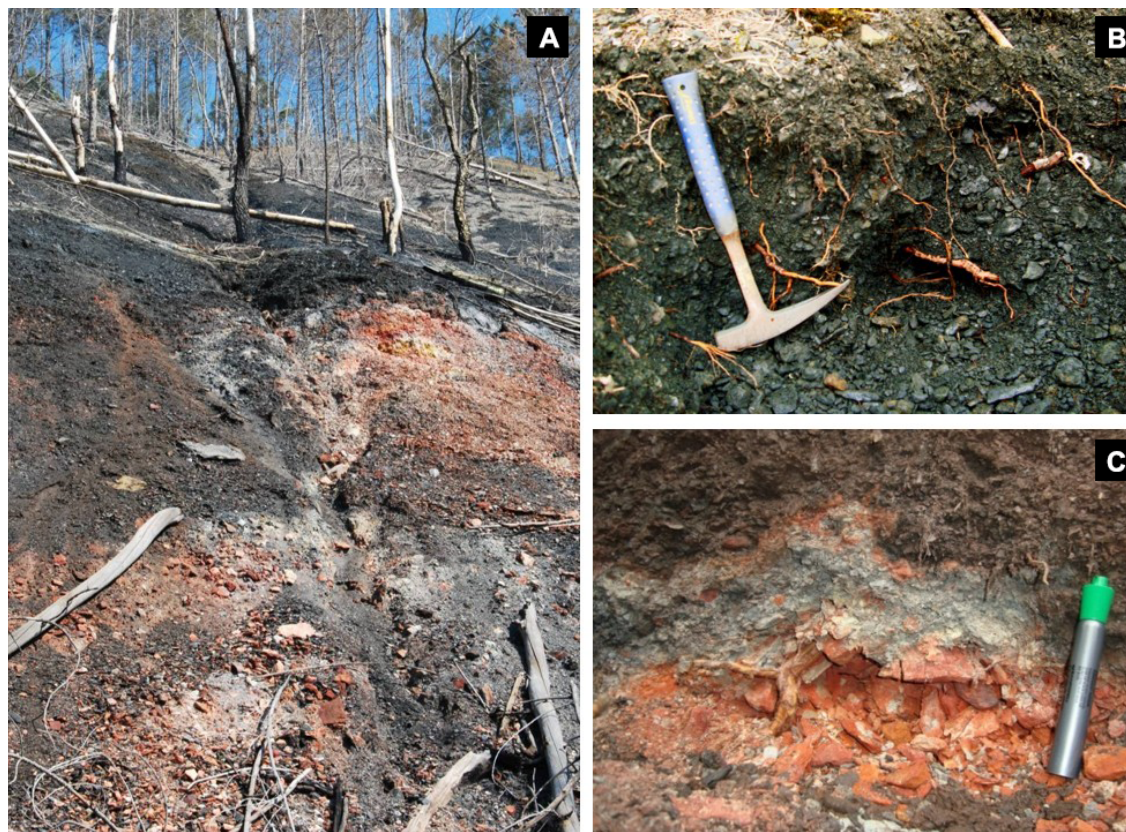


Figura 5 – (A) Aspeto geral da área queimada na escombreira de São Pedro da Cova; (B) Pormenor do material não queimado; (C) Queimado.

As metodologias utilizadas para a análise dos materiais das escombreiras incluíram: microscopia óptica de reflexão, microscopia eletrónica de varrimento e microanálise por raios-X, difração de raios-X, determinação de parâmetros magnéticos (susceptibilidade magnética e magnetização isotérmica remanescente), análises geoquímicas imediata e elementar, espectrometria de massa acoplada a plasma indutivo e cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa.

O estudo petrográfico dos materiais das escombreiras revelou que a fração carbonosa evidencia alterações muito intensas quando sujeita à autocombustão (Ribeiro et al. 2010a; Ribeiro et al. 2022). Nas partículas de matéria orgânica em amostras afetadas pela autocombustão observou-se o desenvolvimento de fissuras e microfraturas, vacúolos de desvolatilização, partículas com refletância superior à do carvão original, bordos de reação com refletância inferior, a formação de carbono pirolítico, e a formação de partículas de *char*. Na fração mineral destacaram-se os óxidos de ferro, cuja formação, devido à combustão, se refletiu igualmente nos valores mais elevados de susceptibilidade magnética. A Figura 6 mostra alguns dos efeitos da combustão nas frações orgânica e inorgânica.

Comparando as composições mineralógicas das amostras não afetadas e afetadas pela

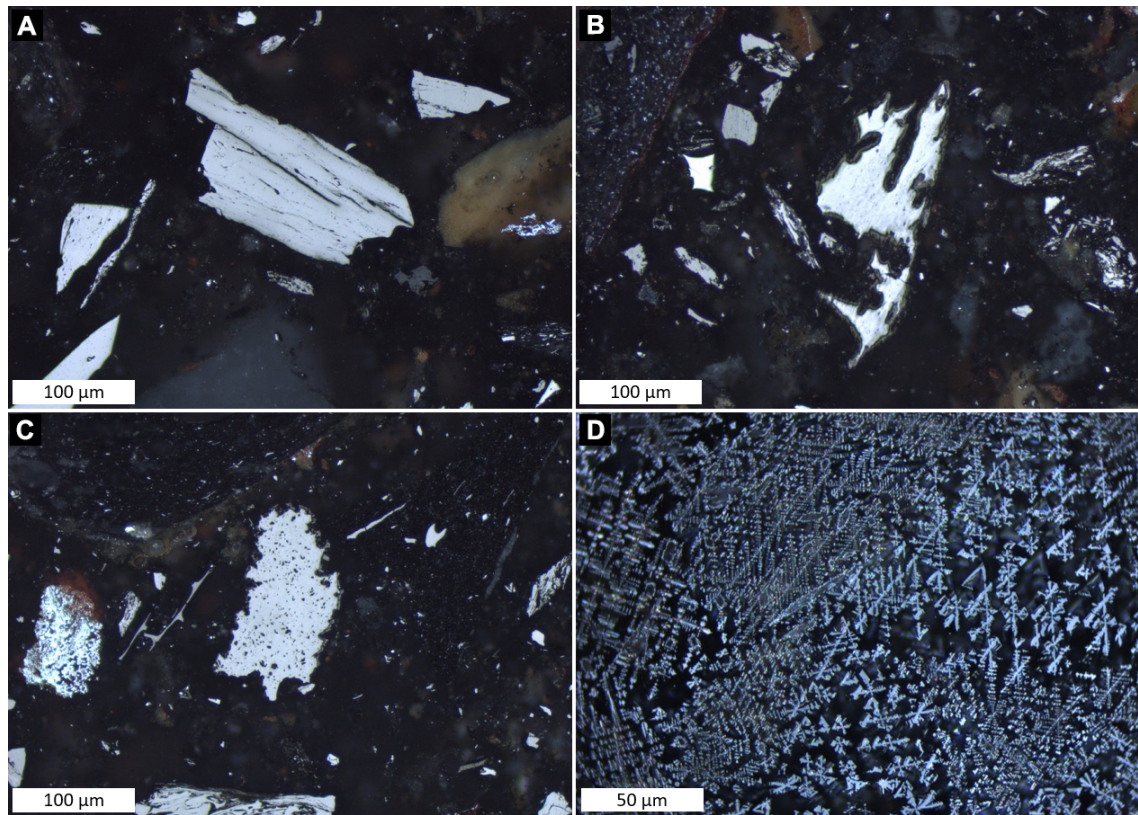


Figura 6 – Fotomicrografias petrográficas que mostram alterações causadas pelo processo de combustão de resíduos mineiros. (A) Partícula orgânica com fissuras e bordos de reação com menor refletância; (B) Partícula orgânica com maior refletância, bordos de reação com menor refletância e arredondados; (C) Partícula orgânica com vacúolos de desvolatilização e bordos de reação com menor refletância e arredondados; (D) Neoformação de óxidos de ferro.

autocombustão verificou-se a formação de novas fases minerais como consequência do efeito térmico associado ao processo de combustão. As fases minerais exclusivamente identificadas nos materiais sujeitos à autocombustão, tais como a hematite, a mullite e a cristobalite, sugerem que a temperatura de combustão poderá ter atingido, pelo menos, os 1000 °C (Ribeiro et al. 2015). Na medição direta da temperatura na superfície de áreas em autocombustão, com recurso a uma câmara termográfica, registaram-se valores máximos de cerca de 100 °C, que são dependentes das variações sazonais. Na medição pontual direta da temperatura a cerca de 1 m de profundidade na escombreira de São Pedro da Cova, com recurso a um sensor de fibra óptica, registou-se uma temperatura de quase 800 °C (Ribeiro et al. 2013).

A comparação entre as composições químicas dos materiais afetados pela combustão e dos materiais não afetados pela combustão permitiu identificar alterações causadas pelo efeito térmico (Çelebi e Ribeiro 2023; Ribeiro et al. 2010a; Ribeiro et al. 2011; Ribeiro et al. 2022). A concentração mais elevada de alguns elementos químicos nos materiais queimados resulta da combustão da

fração orgânica (principalmente do carbono), com consequente aumento da fração inorgânica. Por outro lado, a diminuição da concentração de elementos como o As, Cd, Co, Mn, Pb, Sb, Sn e Zn resulta da volatilização parcial dos mesmos durante a combustão a altas temperaturas ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$). A concentração mais elevada de elementos químicos identificada nos lixiviados obtidos através de ensaios de lixiviação realizados nos materiais das escombrelas, nomeadamente Ca, Cd, Co, Mg, Mn, Na, Ni, S e Zn, são indicadores de que as modificações na composição química tornam alguns elementos mais disponíveis para o processo de solubilização (Ribeiro e Flores 2021).

A determinação da concentração dos 16 HAP considerados como prioritários pelas principais agências ambientais do mundo também evidencia as alterações causadas pela combustão. Estes compostos de origem geogénica ocorrem naturalmente nos materiais carbonosos. Contudo, nos materiais afetados pela autocombustão verifica-se a diminuição da concentração dos HAP prioritários com massa molecular mais baixa e o aumento dos HAP prioritários com massa molecular mais alta (Figura 7), o que indica a formação de HAP de origem pirolítica (Ribeiro et al. 2012).

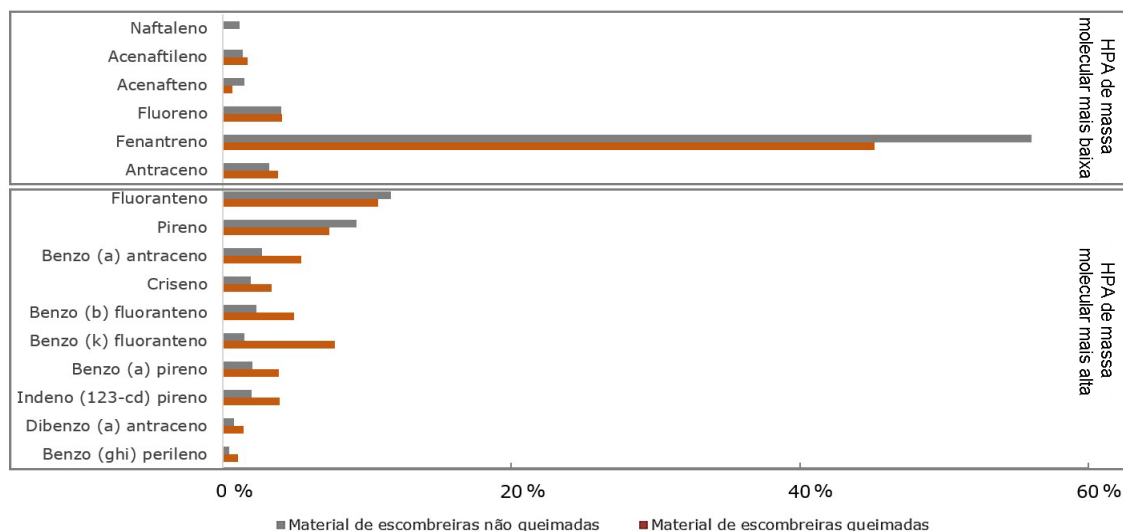


Figura 7 – Abundância relativa dos 16 HAP prioritários para o ambiente em materiais queimados e não queimados. observando-se que nos materiais queimados a proporção de HAP com massa molecular maior é mais elevada.

5. EFEITOS NO MEIO ENVOLVENTE

As escombrelas de minas de carvão contêm na sua composição química elementos considerados potencialmente tóxicos (EPT), assim como HAP (Gombert et al. 2019), que podem disseminar-se no meio envolvente, causando impactes nos solos, bem como na água subterrânea e de superfície.

5.1. Estudos hidropedológicos na escombreira de São Pedro da Cova

Os contaminantes podem ser lixiviados durante a percolação da água meteórica, dependendo das características dos resíduos, nomeadamente a granulometria, o grau de meteorização, a composição química e a mineralogia, bem como das condições climáticas, da evolução pedológica, da condutividade hidráulica do meio poroso e da ocorrência de autocombustão (Liu Simon et al. 2019). O estudo deste tipo de lixiviação deve abranger as condições hidropedológicas que habitualmente determinam a interação água-resíduos num meio de circulação insaturado.

A autocombustão em escombreiras de minas de carvão pode provocar profundas transformações nas condições hidropedológicas, originando grandes contrastes na suscetibilidade à lixiviação de EPT e HAP.

Neste contexto, foi levado a cabo o estudo hidropedológico de dois tecnossolos⁶ contíguos, situados na escombreira da mina de carvão de São Pedro da Cova (Figura 8): um localizado na zona com evolução pedológica normal e o outro na zona afetada pela autocombustão (Espinha Marques et al. 2021). O estudo teve como objetivo identificar contrastes relativos a diversos fatores que controlam a lixiviação dos EPT e dos HAP, nomeadamente: a evolução pedológica (em termos do desenvolvimento dos horizontes do solo), a composição geoquímica e mineralógica, e a condutividade hidráulica insaturada, K_i – medida através do método do infiltrómetro de minidisco (METER 2020). A lixiviação destes contaminantes foi avaliada através de um método desenvolvido pelo *United States Geological Survey* (USGS) para aplicação em resíduos mineiros (Hageman 2007).

No caso do tecnossolo com evolução pedológica normal, a existência de cobertura vegetal permitiu o desenvolvimento de um horizonte O, assim como de dois horizontes minerais: um horizonte A, com acumulação incipiente de matéria orgânica humificada, e um horizonte C. Por outro lado, o processo de autocombustão interrompeu a evolução pedológica e obliterou o horizonte A. Com efeito, neste caso, o perfil do solo desenvolveu três horizontes minerais (designados por C1, C2 e C3), em consequência do gradiente de temperatura do solo superficial.

A composição geoquímica dos horizontes A, C e C1 é semelhante. Relativamente aos horizontes C2 e C3, foram identificados alguns contrastes relativos tanto aos elementos maiores como aos elementos vestigiais (incluindo EPT). No que respeita aos três horizontes afetados pela autocombustão, observou-se uma distribuição dos elementos dependente da temperatura, com destaque para o aumento de Al e As com a profundidade.

As alterações mineralógicas observadas no material afetado pela autocombustão indicam uma maior suscetibilidade à lixiviação, uma vez que este tecnossolo se caracteriza pela presença

⁶ Os tecnossolos são solos cujas propriedades e pedogénese são dominadas pela sua origem técnica. Contêm uma quantidade significativa de artefactos (algo no solo reconhecidamente fabricado ou fortemente alterado pelo homem, ou extraído de grandes profundidades) ou são selados por material duro, de natureza técnica (material duro criado pelo homem, com propriedades diferentes das rochas naturais) ou contêm uma geomembrana. Incluem solos provenientes de resíduos (aterros, lamas, cinzas e resíduos de minas), pavimentos (incluindo os materiais não consolidados subjacentes), solos com geomembranas e solos construídos (IUSS 2015).

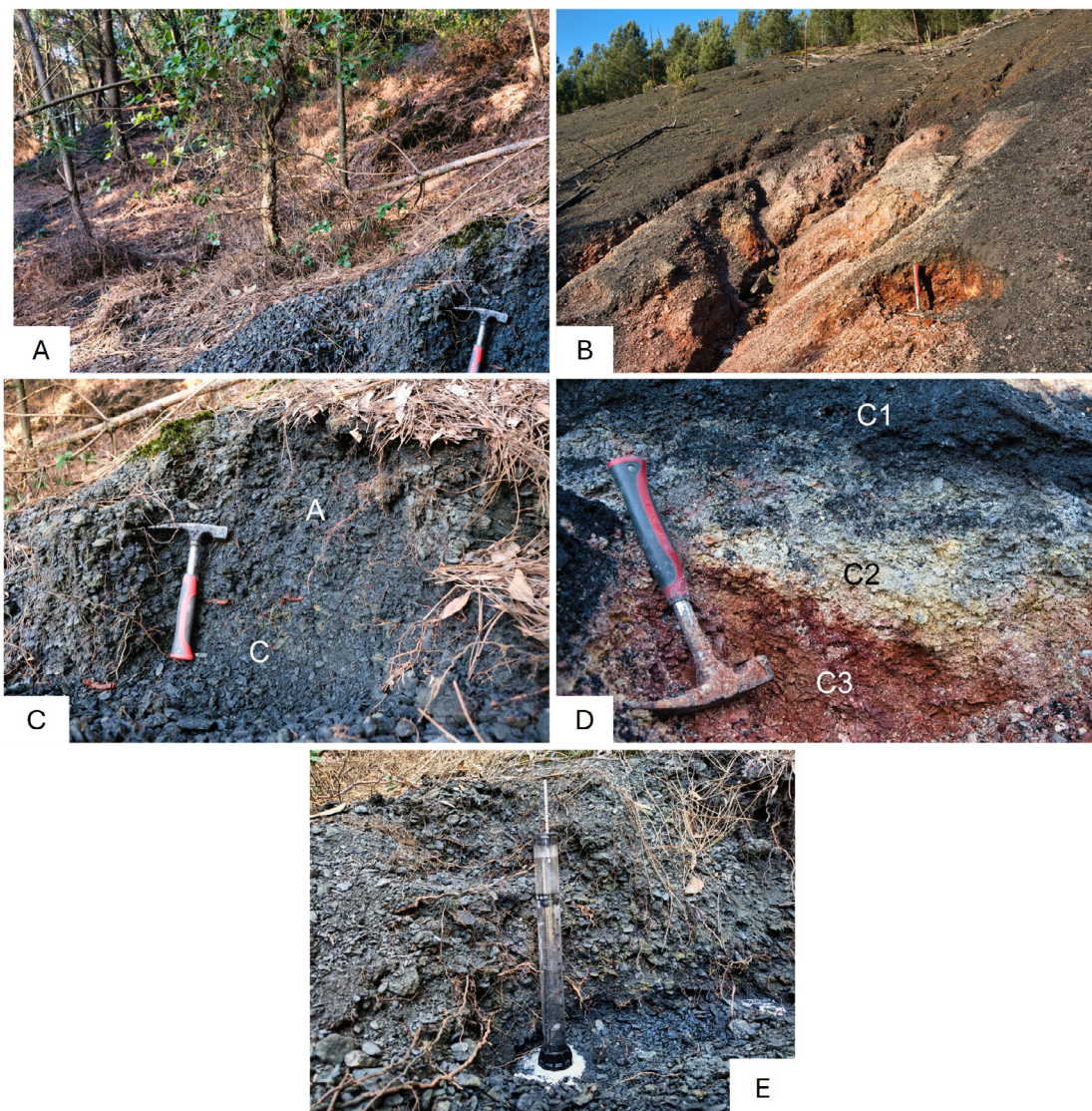


Figura 8 – Alguns aspetos do estudo hidropedológico da escombreira de São Pedro da Cova: (A) Tecnossolo com evolução pedológica normal; (B) Tecnossolo afetado pela autocombustão; (C) Horizontes A e C do tecnossolo com evolução pedológica normal; (D) Horizontes C1, C2 e C3 do tecnossolo afetado pela autocombustão; (E) Medição da condutividade hidráulica insaturada.

de minerais argilosos com maior capacidade de troca iónica e maior superfície específica (ilite e esmectite), bem como de sulfatos de ordem estrutural mais baixa (jarosite e alunite) (Espinha Marques et al. 2021).

O valor de K_i medido no tecnossolo com pedogénese normal foi de 10^{-3} cm/s, nos horizontes A e C. Por outro lado, a autocombustão provocou contrastes de K_i entre os diferentes horizontes do

solo: 10^{-3} cm/s no horizonte C1, 10^{-4} cm/s no horizonte C2 e 10^{-2} cm/s no horizonte C3. O valor mais reduzido de K_i no horizonte C2 corresponde a uma textura do solo mais fina.

No que respeita à lixiviação de EPT e HAP observaram-se, igualmente, alterações consideráveis devidas à autocombustão. A concentração de EPT nos lixiviados de ambos os horizontes A e C do tecnossolo, com evolução pedológica normal, é semelhante. Todavia, nos lixiviados do tecnossolo afetado pela autocombustão, a hidrogeoquímica dos EPT é bastante diferente. Neste caso, a lixiviação de Al, Mn e Zn aumenta com a profundidade (ou seja, do horizonte C1 para o horizonte C3), aparentando ser dependente da temperatura. Verificou-se, ainda, que a proporção de EPT nos resíduos não corresponde à sua proporção nos lixiviados. Por exemplo, os EPT mais abundantes nos resíduos são o Cr, o As e o Pb, ao passo que nos lixiviados prevalecem o Zn e o Mn.

A autocombustão exerceu uma forte influência sobre o tipo e a concentração de HAP nos lixiviados de ambos os tecnossolos. Com efeito, os lixiviados do tecnossolo afetado pela autocombustão apresentaram uma maior concentração e variedade de HAP na parte inferior do perfil do solo (horizonte C3), devido à temperatura mais elevada aí atingida, bem como ao efeito da lixiviação do material sobrejacente (horizontes C1 e C2). Além disso, observou-se também que no horizonte C3 predominam os HAP de massa molecular mais elevada.

Em síntese, o estudo revelou que a autocombustão provocou intensas modificações nas características hidropedológicas dos tecnossolos da escombreira de São Pedro da Cova. Os resultados obtidos são relevantes para o estudo do impacto ambiental das escombreiras de minas de carvão, bem como para o estabelecimento de estratégias de remediação.

5.2. Efeitos sobre os solos na área envolvente da escombreira

Os resíduos mineiros de carvão contêm, geralmente, HAP e EPT, como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, considerados elementos perigosos para o ambiente, passíveis de causar contaminação nos solos, bem como problemas para a saúde humana durante as etapas de extração, preparação ou mesmo combustão. Os solos na área envolvente da escombreira de São Pedro da Cova foram estudados com o objetivo de identificar e caracterizar as alterações físicas e químicas promovidas pela escombreira em autocombustão há 17 anos. Para o efeito, foram realizadas duas campanhas de amostragem (em fevereiro e outubro de 2019, correspondentes ao final da estação húmida e da estação seca, respetivamente), que incluíram a recolha de 50 amostras de solo em cada uma delas, na área envolvente da escombreira, distribuídas pelas principais áreas de drenagem, bem como pelas áreas a montante. Os solos foram caracterizados geoquimicamente, tendo-se recorrido à estatística multivariada em combinação com metodologias geoestatísticas para estudar as relações estatísticas e espaciais dos diferentes elementos e inferir as fontes de EPT (Santos et al. 2023b).

A distribuição espacial dos valores de pH do solo demonstrou que a escombreira de São Pedro

da Cova não promoveu drenagem ácida significativa nos solos circundantes (Figura 9). Os valores mais baixos de pH estão localizados a Este, em áreas florestais topograficamente mais elevadas, posicionadas a montante da escombreira. As amostras recolhidas ao longo da área de escorrência da escombreira não apresentaram valores de pH significativamente ácidos, variando entre 6,1 e 6,4. Apenas uma amostra localizada no limite exterior da área de escorrência da escombreira, registou um pH ácido de 4,8. No entanto, este ponto de amostragem é contíguo ao pH ácido medido a montante, a Este, pelo que se julga que possa estar sob a sua influência.

Foram identificadas diferentes fontes de contaminação que contribuem para a assinatura geoquímica dos solos na área envolvente da mina. Identificou-se que, para além da influência das escombreyras, existem outros fatores de impacto sobre os solos, nomeadamente a contaminação urbana antropogénica em áreas contíguas às escombreyras ou a presença de valores do fundo geoquímico regional⁷, naturalmente mineralizados devido à circulação de fluidos enriquecidos em vários EPT que atuaram na região (Figura 10).

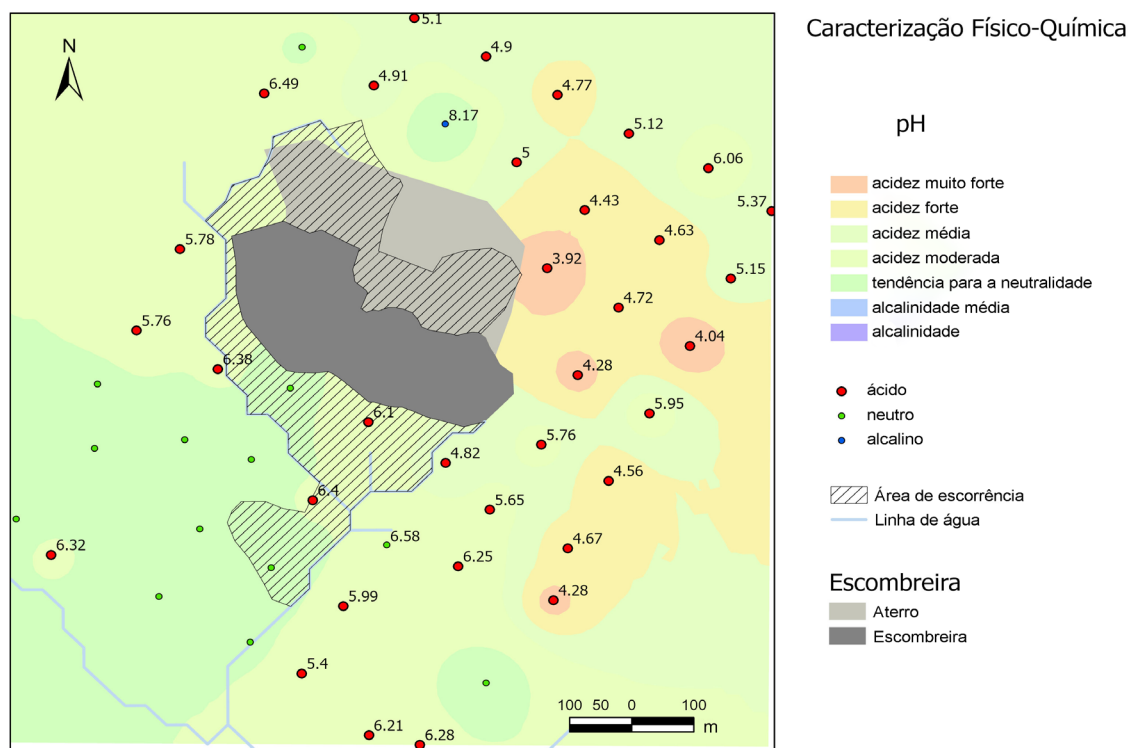


Figura 9 – Distribuição espacial do pH na área de estudo, inferida a partir do *Inverse Distance Weighting* – IDW, incluindo os valores individuais determinados em cada uma das amostras.

⁷ Fundo geoquímico regional – Intervalo natural de concentrações de um elemento químico numa dada matriz geológica regional (solo, sedimentos, rocha, água), sem influência de contaminação antrópica (em inglês designado *regional geochemical background*).

A distribuição espacial de Cu, Pb, Zn, Cd, e Sn concentrou-se preferencialmente em áreas urbanas localizadas no topo da vertente, a Oeste da escombreira. Neste caso, as correlações entre elementos sugeriram que as fontes pudessem ter origem antropogénica, relacionada com a contaminação urbana. O As, o Mo e o Cr demonstraram uma boa associação espacial e correlação estatística. As concentrações mais elevadas destes elementos foram identificadas a montante da escombreira, seguindo as tendências das orientações litológicas e estruturais regionais NO-SE, apontando para uma natureza pedogenética relacionada com as concentrações de fundo geoquímico, naturalmente

elevadas destes elementos, na região do anticlinal de Valongo.

A distribuição espacial destacou ainda duas fontes subdominantes de As nos solos. A primeira fonte, localizada a aproximadamente 250 m da escombreira, ao longo da área de drenagem, apesar de não mostrar uma clara correlação espacial com outros EPT, associava-se espacialmente com o Se e o Sb, apontando para um efeito de lixiviação a partir dos resíduos da escombreira. A segunda área enriquecida em As localizava-se numa zona urbana, a montante da escombreira, associada espacialmente a outros EPT, tais como o Co, o Ni, o Pb, o Zn, o Cu e o Cd, apontando para uma fonte de contaminação antropogénica urbana.

As concentrações mais elevadas de U, Th, Ba, Be e Ta distribuíram-se preferencialmente ao longo de unidades carboníferas

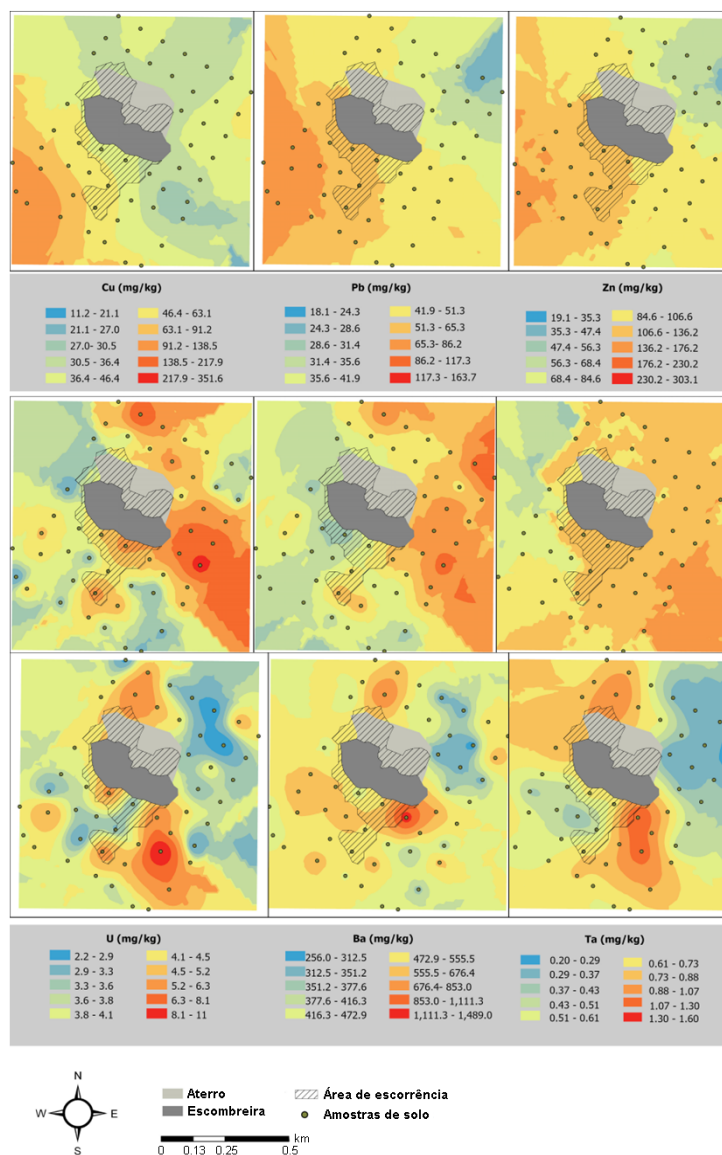


Figura 10 – Distribuição espacial de Cu, Pb, Zn, As, Mo, Sb, U, Ba e Ta nos solos da envolvente da mina de São Pedro da Cova, inferida por meio de *Ordinary Kriging*.

compostas por conglomerados, arcoses, xistos carbonosos e carvões (Medeiros et al. 1980), apontando para uma fonte litogénica.

Os resultados de geoquímica das duas campanhas de colheita de solos foram idênticos, sendo as concentrações médias dos elementos vestigiais semelhantes. No entanto, desde a primeira campanha, realizada no final da estação húmida, até à segunda campanha, no final da estação seca, verificou-se uma tendência generalizada dos solos em manterem ou reduzirem ligeiramente as concentrações de elementos vestigiais, à exceção do Pb e do Zn, que aumentaram ligeiramente (Teodoro et al. 2021).

Vários elementos, nomeadamente Sb, Ba, U, As, V, Be, Cr, Mo, Pb e Se, excederam os valores de referência propostos pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA 2019) para a identificação de solos contaminados em zonas agrícolas (em áreas ambientalmente sensíveis), de 1,0 mg/kg (Sb), 210,0 mg/kg (Ba), 1,9 mg/kg (U), 11,0 mg/kg (As), 86,0 mg/kg (V), 2,5 mg/kg (Be), 67,0 mg/kg (Cr), 2,0 mg/kg (Mo), 45,0 mg/kg (Pb) e 1,2 mg/kg (Se), tanto a montante como a jusante da escombreira. Da primeira para a segunda campanha, o número de amostras contaminadas diminuiu, exceto para o caso do Pb e do Ta.

Foram, ainda, identificados e quantificados nos solos os 16 HAP prioritários para o ambiente, de acordo com a respetiva distribuição espacial, tendo-se inferido as suas origens pirogénicas ou petrogénicas.

Os HAP concentraram-se a jusante da escombreira, ao longo das áreas de escorrência, apresentando não só uma maior variedade dos 16 HAP prioritários, como uma maior concentração de HAP com massa molecular mais elevada, o que aponta para uma origem pirogénica, possivelmente relacionada com o fenómeno de autocombustão que ocorre, frequentemente, na escombreira.

Santos et al. (2023a) avaliaram os riscos ecológicos para a saúde humana associados à exposição a EPT nestes solos. O índice de potencial risco ecológico, determinado com base em valores de fundo geoquímico regional, foi considerado baixo para 90% das amostras. Apenas cinco pontos de amostragem, que não se encontravam localizados perto das zonas de escorrência ou drenagem da escombreira, apresentaram um risco ecológico moderado. Estes resultados sugerem que a escombreira não apresenta um risco ecológico significativo.

Relativamente ao risco carcinogénico, o índice de risco (HI) da exposição total resultante da ingestão, inalação e contacto dérmico com os EPT considerados sugere que não existe um potencial risco para a saúde humana, tanto para crianças como para adultos, nos solos estudados. O risco carcinogénico total determinado, utilizando os EPT estudados, tanto para crianças como para adultos, é baixo.

5.3. Efeitos sobre as águas

Na área envolvente da escombreira da antiga mina de carvão de São Pedro da Cova, os efluentes de drenagem da mina são frequentemente utilizados nas atividades agrícolas pelos agricultores locais, por constituírem uma fonte de água acessível e de baixo custo. Contudo, a utilização destes recursos não convencionais requer dados de referência sobre a sua qualidade, visto serem considerados formas potencialmente graves e persistentes de contaminação, com impactes deletérios para o homem e para o meio ambiente. No entanto, a concentração de contaminantes nestes efluentes de drenagem depende das condições geológicas, hidrológicas e do tipo de mineração praticado (Potter et al. 2009).

Em São Pedro da Cova existem duas galerias de drenagem, cujos efluentes são descarregados a cerca de 1 km a SE da antiga mina, produzindo um sedimento de cor ocre que se vai acumulando continuamente nos solos e cursos de água locais (ribeira de Silveirinhos e rio Ferreira). A água da ribeira de Silveirinhos é captada a jusante das descargas de drenagem da mina e usada, há muitos anos, para a rega de uma grande variedade de culturas, sem qualquer tipo de controlo. A cadeia alimentar é uma das vias mais importantes de exposição dos seres humanos a contaminantes, cuja absorção pelas plantas através do sistema solo-raiz, com translocação/acumulação nos tecidos vegetais, é significativa no caso de culturas irrigadas com águas contaminadas, como é o caso.

A avaliação da qualidade da água de rega é atualmente efetuada através de diversas diretrizes legais propostas por vários países e organizações, que combinam abordagens mais conservadoras e mais liberais que, apesar de muito úteis, nem sempre são satisfatórias e adequadas, atendendo à grande variabilidade de origens e naturezas de água usadas para este fim. Estes regulamentos baseiam-se, na sua maioria, num documento sobre a qualidade da água para a agricultura, publicado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) em 1985, e reimpresso em 1994, o qual apresenta um conjunto de diretrizes referentes a procedimentos práticos para avaliar e gerir os problemas relacionados com a qualidade da água de rega, enfatizando os impactes a longo prazo (Ayers e Westcot 1994).

Entre 2017 e 2019, foi realizado um estudo com o objetivo de proceder à caracterização físico-química dos efluentes das duas galerias de drenagem da mina (G1 e G2), as quais correspondem às águas subterrâneas que circulam no maciço rochoso explorado, assim como de amostras de água superficial da ribeira de Silveirinhos colhidas a montante (SS-U) e a jusante (SS-D) das galerias de drenagem, para avaliar a sua aptidão para fins agrícolas. Realizaram-se 9 campanhas de amostragem, tendo sido recolhidas um total de 34 amostras.

Foram analisados 46 parâmetros de qualidade da água, constantes nas diretrizes da FAO e na legislação portuguesa que define a qualidade da água para rega - Decreto-Lei n.º 236/1998, de 1 de agosto. Foram, igualmente, analisados alguns EPT e os 16 HAP, dada a sua importância como contaminantes prioritários e persistentes, cuja mobilização pode resultar de processos

de oxidação e autocombustão, com elevada importância para a saúde humana por serem genotóxicos, mutagénicos e carcinogénicos.

Propôs-se, igualmente, um modelo de cálculo de um Índice de Qualidade da Água (IQA) para avaliar estes recursos. Os índices constituem representações simplificadas de realidades complexas e permitem representar um grande número de parâmetros num único valor, facilitando a gestão operacional dos recursos hídricos e a avaliação da sua adequação ao uso pretendido. Foram também propostos dois outros índices: o de Contaminação (IC) e o de Toxicidade (IT), com base em grupos específicos de 18 e 17 parâmetros físico-químicos, respetivamente (Kachroud et al. 2019).

Os resultados foram comparados com as diretrizes da FAO, a fim de avaliar a adequação da água para rega.

As amostras de água colhidas a montante das galerias (SS-U) apresentaram resultados abaixo dos limites máximos/recomendados propostos pela FAO para água de rega, com a exceção dos valores de pH, que se revelaram ligeiramente inferiores a 6,5, devido às características geológicas da bacia hidrográfica, sendo as águas consideradas neutras a ligeiramente ácidas.

Os efluentes das galerias de drenagem mineira apresentam uma salinidade média a alta e um pH aproximadamente neutro. Uma origem plausível do processo de neutralização pode advir da mistura de água subterrânea ácida, de circulação pouco profunda, com água termomineral alcalina, de circulação mais profunda, possivelmente através de falhas. Esta hipótese é corroborada pelo teor relativamente elevado em fluoretos nas amostras G1 e G2, quando comparado com os das amostras SS-U, bem como pela temperatura da água medida *in situ* durante as nove campanhas de amostragem. As temperaturas em G1 e G2 permaneceram elevadas e constantes durante o estudo, com valores médios de $18,9\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $19,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, respetivamente, significativamente mais elevadas do que a temperatura média anual do ar.

Quando comparadas com os padrões internacionais de qualidade da água para rega, as águas afetadas são consideradas impróprias, sendo que os principais *outliers* aos valores limite constantes das diretrizes são o Fe, o Mg, o K e o bicarbonato (HCO_3^-). Foram, também, detetados HAP, sobretudo com massa molecular baixa, apresentando concentrações médias que variaram de 62% a 80%, o que indica uma origem petrogénica consistente com a circulação de água na mina de carvão. Os HAP cancerígenos representaram 28,8% e 27,6% da concentração média total dos 16 compostos estudados, em contraste com os 5,6% e os 6,7% detetados nas amostras SS-U e SS-D, respetivamente.

O impacto da atividade mineira em termos de fácies hidrogeoquímica e de conteúdo em iões principais é ilustrado no diagrama de Stiff (Figura 11). A água de superfície sem influência mineira (SS-U) apresenta uma fácies $\text{SO}_4/\text{Cl-Na/Mg}$, enquanto que as águas de drenagem da mina (G1 e G2), bem como as amostras colhidas a jusante da descarga dos efluentes (SS-D), apresentam uma fácies $\text{SO}_4\text{-Mg}$.

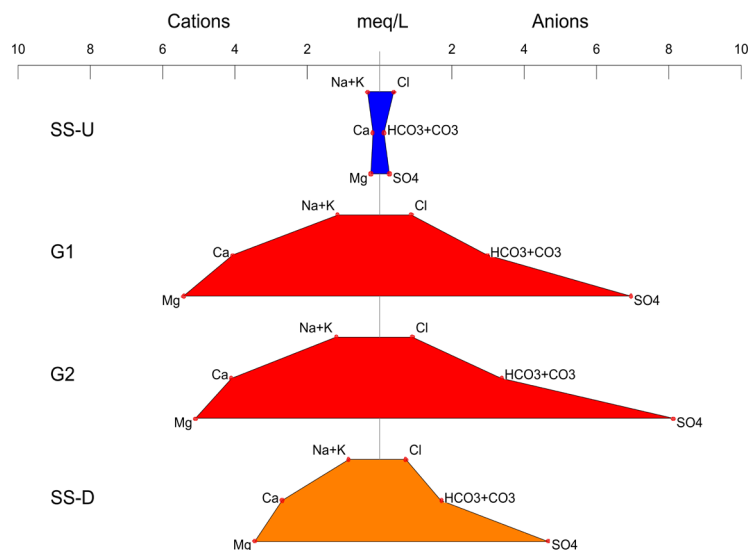


Figura 11 – Diagrama de Stiff das águas estudadas (valores médios de abril 2017 a dezembro 2019, n = 9) (Mansilha et al. 2021).

seguidos do As e da condutividade elétrica. A Figura 12 mostra a flutuação dos valores do IQA e da precipitação média mensal durante o período temporal do estudo. Verificou-se que os valores mais elevados correspondem aos meses mais secos, devido à diminuição ou ausência de mistura entre a água da drenagem mineira com a água da precipitação recentemente infiltrada.

Os resultados do IC são, em geral, comparáveis aos valores do IQA, indicando um elevado grau de contaminação, sobretudo nas amostras G1 e G2. O cálculo do IT indicou o Mg e o K como elementos com maior impacto toxicológico nos perfis das águas poluídas (G1, G2 e SS-D), seguidos do amónio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) e Al. Em relação às amostras de água SS-U, o NO_3^- foi o constituinte mais importante em termos de qualidade da água, seguido do K, Al e Zn.

Os resultados revelaram que as amostras associadas às atividades mineiras são consideradas inaceitáveis ou impróprias para rega.

Os efluentes de drenagem das minas de carvão abandonadas provocam fortes impactos na saúde e no ambiente, constituindo, frequentemente, um risco grave, mas continuam a ser negligenciados, principalmente devido à falta de provas documentadas.

Tendo em conta os resultados deste estudo, as autoridades locais, juntamente com a comunidade científica, deverão empenhar-se em mitigar os efeitos deletérios de antigas atividades mineiras, através do desenvolvimento de melhores estratégias de gestão e remediação da contaminação ambiental, bem como do investimento em soluções a curto e a longo prazo. Para tal, é fundamental conhecer a qualidade das águas, a fim de conceber sistemas de tratamento eficazes. Os sistemas passivos de tratamento dos efluentes de drenagem das minas abandonadas

O IQA demonstrou, igualmente, o impacto dos efluentes de drenagem da mina nas águas superficiais locais, sendo as amostras colhidas a montante (SS-U) das descargas classificadas como excelentes e a jusante (SS-D) como más. G1 e G2, conforme esperado, foram classificadas como muito más. Dos 18 parâmetros considerados para o cálculo deste índice, o Fe e o Mg foram os dois parâmetros mais decisivos,

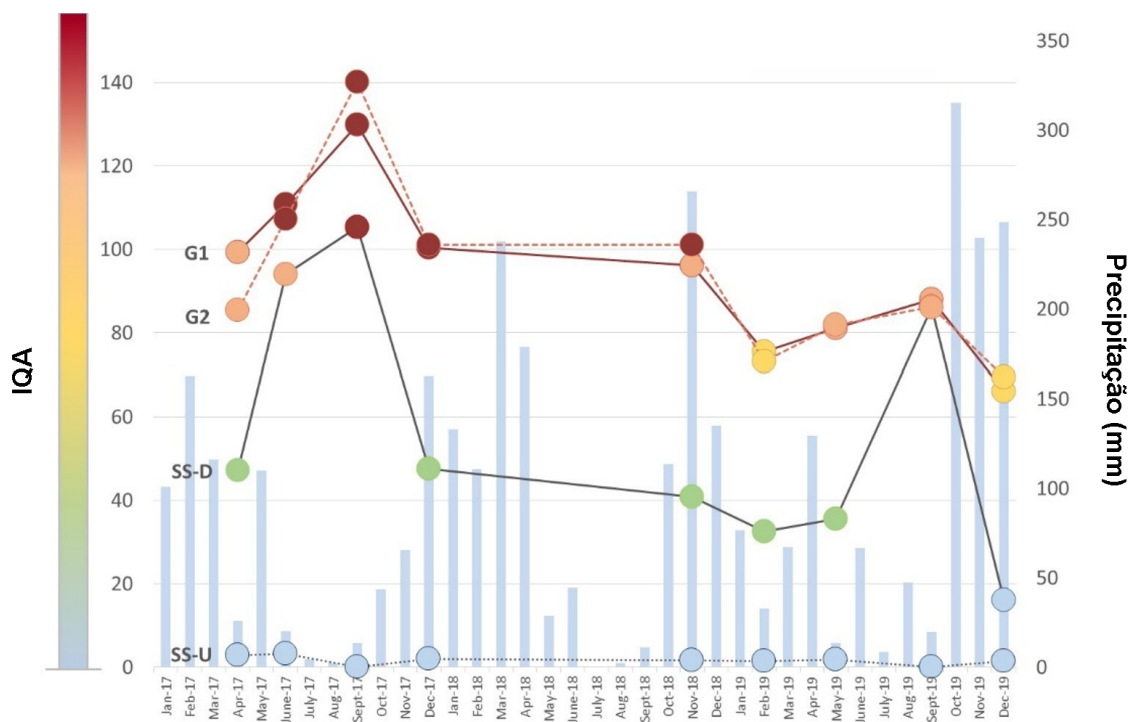


Figura 12 – Relação entre a precipitação mensal (estação meteorológica do Porto, dados do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P.) e a qualidade da água (IQA) (modificado de Mansilha et al. 2021).

podem constituir uma opção fiável e economicamente vantajosa relativamente aos sistemas ativos, se adequadamente concebidos, construídos e mantidos (Hedin et al. 2013). Os efluentes, depois de tratados, podem então ser lançados em sistemas de armazenamento e utilizados pelos agricultores locais para rega das suas culturas.

É, pois, recomendável uma intervenção rápida, de cariz multidisciplinar, não só porque a mina e a escombreira estão localizadas perto do centro populacional da vila de São Pedro da Cova e de diversas infraestruturas sociais, mas também para mitigar a contaminação das águas e dos terrenos agrícolas adjacentes.

6. MONITORIZAÇÃO AMBIENTAL

A monitorização ambiental da escombreira de São Pedro da Cova foi realizada através da conjugação de várias componentes tecnológicas, nomeadamente: (i) sistemas de sensores de fibra óptica; (ii) veículos aéreos não tripulados (VANT); e, (iii) sistemas de informação geográfica (SIG).

6.1. Sistemas de sensores de fibra óptica

O princípio subjacente aos sensores com suporte na fibra óptica consiste em modificar uma ou mais das propriedades da luz que se propaga na fibra pela ação de uma grandeza específica que se pretende determinar, a qual pode ser de natureza física, química ou bioquímica. A luz assim modulada propaga-se até à região de fotodeteção e de processamento (que pode estar a dezenas de quilómetros da zona de deteção por sensores), sendo que pela análise das características dessa modulação se procura obter informações sobre o estado da grandeza que está a ser objeto de medição (Santos e Farahi 2014).

Tem sido registada a utilização de sistemas de fibra óptica em minas de carvão, tendo sido identificados os benefícios que daí decorrem nas vertentes da segurança, da produtividade e também ao nível dos custos operacionais (Zhang et al. 2014). No entanto, até à concretização do projeto ECOAL, nunca se considerou a aplicação destas tecnologias de utilização de sensores na monitorização de escombrelas de carvão em combustão, sendo que um dos focos deste projeto consistiu, precisamente, na aferição do seu desempenho na monitorização distribuída da temperatura e da emissão de gases nestes ambientes, os quais são caracterizados por uma elevada agressividade térmica e química.

Nas secções seguintes são detalhadas e caracterizadas as duas componentes do sistema instalado, nomeadamente: (i) a relativa à monitorização da temperatura ao longo da escombrela, e (ii) a respeitante à monitorização de certos gases resultantes da combustão.

6.1.1. Monitorização da temperatura

Sensores de elevada temperatura que sejam robustos e com um desempenho consistente são indispensáveis em diversas aplicações, de que são exemplo, as relativas ao processamento de materiais e na monitorização de túneis a profundidades elevadas, assim como de poços de extração de petróleo e gás. Nestes ambientes, os sensores elétricos tradicionais para medição da temperatura apresentam várias limitações, desde logo a necessidade de cablagem elétrica, o que os torna sensíveis à interferência eletromagnética. O mesmo não acontece com os sensores de base óptica, em particular a baseada em fibra óptica, pois sendo esta também um canal de comunicação, possibilita que a unidade de deteção e processamento esteja distante da região de medição. A isto acresce a sua imunidade intrínseca a interferências eletromagnéticas e a elevada sensibilidade característica do domínio óptico. Do conjunto vasto de sensores com suporte em fibra óptica, destacam-se os baseados nas designadas redes de Bragg (FBG), pois aqui o parâmetro medido, no caso a temperatura, atua no comprimento de onda da luz, uma grandeza que não necessita de referenciação, como aconteceria caso fosse a intensidade da luz a grandeza alvo de modulação (Morozov 2021).

As redes de Bragg são microestruturas com modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica, as quais exibem comportamento ressonante quando a luz que nelas incide

se situa num intervalo estreito de comprimentos de onda, sendo esses comprimentos de onda refletidos por esses dispositivos. As condições de ressonância dependem da temperatura e da deformação a que as redes se encontram sujeitas, pelo que a monitorização dos comprimentos de onda da luz refletida por estas estruturas possibilita obter informações sobre essas grandezas. Deste modo, é permitido utilizar as redes de Bragg como sensores de fibra óptica para medir a temperatura e a deformação como grandezas primárias e, através destas e utilizando uma interface adequada, medir outros parâmetros de natureza diferente.

No projeto ECOAL, estas estruturas foram utilizadas para determinar a temperatura de forma pontual e como elementos de calibração nos sensores de gás.

No que diz respeito à determinação da temperatura ao longo da escombreira, outra tecnologia de sensores com suporte em fibra óptica foi utilizada, baseada no espalhamento de Brillouin, que decorre da presença de efeitos não-lineares na fibra óptica (Bao et al. 2021).

6.1.2. Monitorização de gases

O princípio subjacente à deteção de gases reside, em larga medida, na absorção óptica que ocorre quando a radiação atravessa a região, cuja concentração de gases se pretende determinar. Em torno deste conceito, foi sendo desenvolvido um conjunto diversificado de técnicas de deteção gasosa ao longo dos anos, sendo a *Wavelength Modulation Spectroscopy* (WMS) uma das mais bem-sucedidas, essencialmente porque possibilita uma elevada seletividade e sensibilidade, e porque pode ser implementada na zona do infravermelho do espectro eletromagnético, beneficiando assim da disponibilidade do vasto conjunto de componentes, dispositivos e subsistemas utilizados no domínio das comunicações ópticas (Chakraborty e Roy 2021).

A técnica WMS baseia-se na determinação do nível de atenuação da potência óptica de uma linha espectral estreita, quando esta se situa na zona de absorção do gás, cuja concentração se pretende determinar. A identificação desse nível é obtida com elevada precisão, utilizando técnicas avançadas de processamento optoeletrónico, possibilitando um desempenho compatível com um limiar de deteção de variações da concentração de gás em partes por milhão (ppm).

O processo de combustão de escombreiras de carvão gera a emissão de um número elevado de gases, cujas concentrações podem ser inferidas a partir do conhecimento dos valores de emissão dos gases amónia (NH_3), metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Assim, a técnica WMS foi utilizada para a sua monitorização, segundo o esquema geral ilustrado na Figura 13. Para o efeito, foram selecionados lasers semicondutores com emissão nos comprimentos de onda de 1512,21 nm (para a deteção de NH_3), 1653,72 nm (para a deteção de CH_4) e 1572,0 nm (para a deteção de CO_2), com potência suficiente para serem gerados sinais detetáveis, apesar da intensidade reduzida das linhas de absorção destes gases nesta zona espectral do infravermelho próximo.

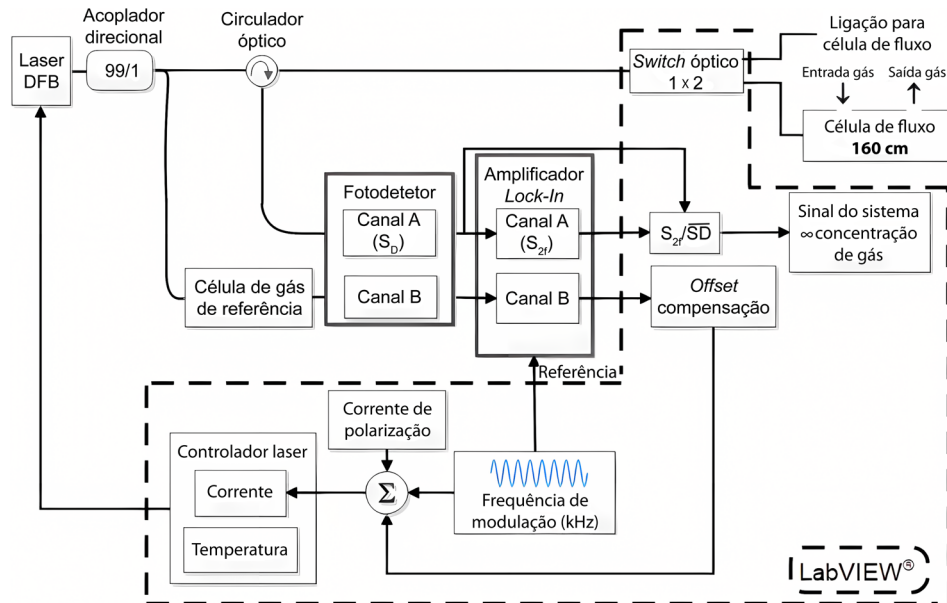


Figura 13 – Esquema do sistema de detecção de gases utilizado no projeto ECOAL (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

Para testar o desempenho deste sistema determinou-se, em tempo real, a concentração de cada um destes gases. Para o efeito, introduziu-se, na célula multipassagem, o gás cuja concentração se pretendia obter (encontrando-se a célula à pressão atmosférica e à temperatura ambiente). A variação da concentração dos gases na célula foi conseguida através da sua mistura com nitrogénio. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 14, indicando que a técnica WMS é adequada para monitorizar a emissão destes gases na escombreira.

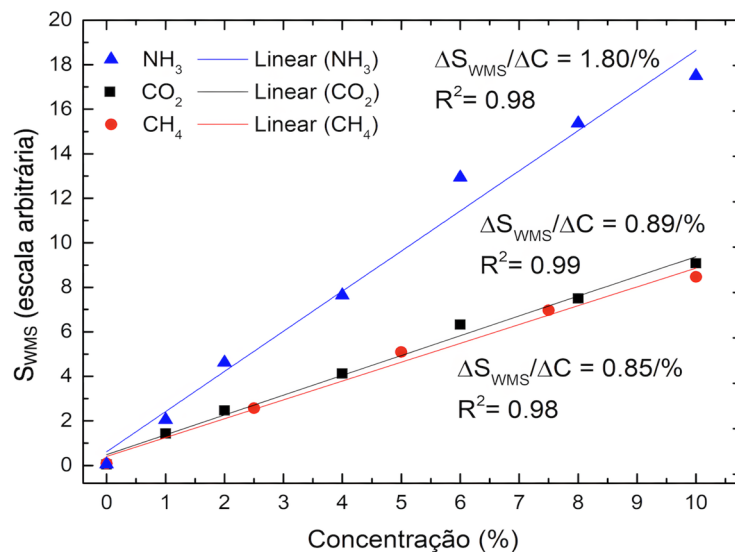


Figure 14 – Saída do sistema de monitorização de gases para os casos da NH₃, CH₄ e CO₂ (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

6.1.3. Sistemas instalados

No sentido de se obter informações que suportem o projeto do sistema de medição da temperatura, a partir de fevereiro de 2013, foi monitorizada a temperatura de uma região da escombreira identificada na Figura 15-A, utilizando-se para o efeito a técnica da termografia infravermelha. A Figura 15-B mostra uma imagem termográfica, assim obtida em fevereiro de 2015, onde se encontra identificado o foco principal da combustão.



Figure 15 – (A) Perspetiva da área em combustão na escombreira, onde é possível observar a estrutura em socacos ao longo do declive, assim como as emissões gasosas; (B) Imagem termográfica utilizada para caracterizar preliminarmente a temperatura nesta zona; (C) Vista aérea da escombreira de São Pedro da Cova (contorno a vermelho), onde é possível identificar: (i) a região onde foi efetuada a medição distribuída da temperatura com um cabo de sensor óptico com de cerca de 1300 m de extensão (linha pontilhada a amarelo); (ii) pontos de medição das emissões gasosas (extremidades das linhas a verde); e (iii) o trajeto do cabo de fibra óptica até ao local de fotodeteção e processamento (linha azul) (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

A localização do sistema instalado de sensores é indicada na Figura 15-C, e a sua arquitetura é apresentada na Figura 16. Para a medição distribuída da temperatura utilizou-se a técnica BOTDA (*Brillouin Optical Time-Domain Analysis*), colocando, para o efeito, o cabo de fibra óptica ao longo da região em combustão da escombreira.

Este cabo de fibra óptica não pode ser um cabo convencional, considerando as elevadas temperaturas a que será submetido. Assim, foi utilizado um cabo com uma construção apropriada, que possibilitou o seu funcionamento adequado até temperaturas de 150 °C, que pode ser aumentada até cerca de 200 °C, caso o cabo seja instalado sem tensão e com uma curvatura reduzida. Duas fibras ópticas estão soltas no interior do cabo, sendo assegurado que a expansão térmica deste não coloca em causa esta condição. Ambas as fibras foram utilizadas na medição, o que assegurava a redundância, sendo que em cada ponto de medição, o valor registado para a temperatura correspondia à média dos valores obtidos em cada uma das fibras.

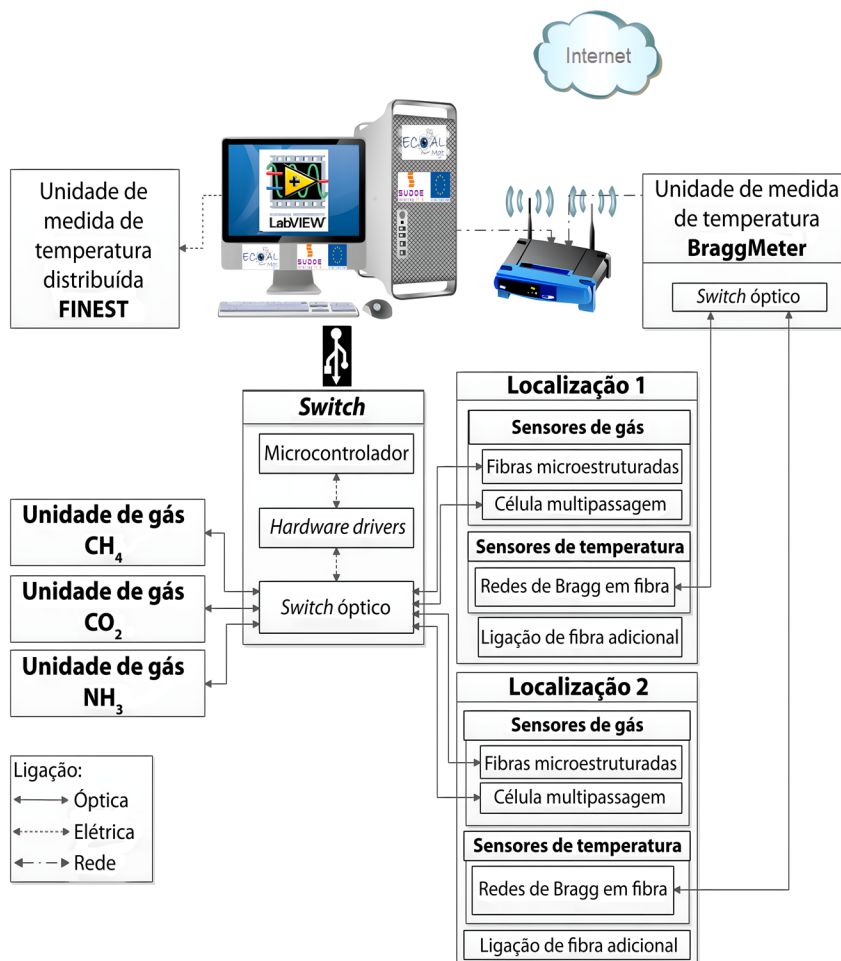


Figura 16 – Estrutura do sistema de fibra óptica para medição de temperatura e emissão de gases concebido no contexto do projeto ECOAL (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

Uma extensão de cabo de ~2600 m foi enterrada a uma profundidade que variava entre 10 cm e 20 cm, ao longo dos socacos construídos na região da escombreira, onde se realizaram as medições (caso o cabo fosse colocado a uma profundidade superior havia o risco da temperatura, a que estava sujeito, exceder o indicado nas suas especificações). Foram monitorizados cerca de 1300 m da região da escombreira, onde o processo de combustão se revelava mais intenso (Figuras 15-C, 15-A e Figura 17 – topo mostra algumas das fases de instalação do cabo de fibra óptica). No final dessa região, foi instalada uma caixa de conexões que permitiu a curvatura controlada do cabo em 180°, possibilitando o seu retorno pelo mesmo percurso, razão pela qual, a extensão do cabo é o dobro da extensão da região monitorizada.



Figura 17 – Fotografias relativas ao processo da instalação do cabo de fibra óptica para medição distribuída da temperatura (cima) e de um dos locais onde foi instalada a estrutura para acolher os sensores de fibra óptica para medição pontual da emissão de gases e da temperatura (baixo) (Ribeiro et al. 2017).

6.1.4. Resultados

Uma campanha de medição da temperatura na escombreira foi realizada ao longo de várias semanas. Para ilustrar o tipo de resultados obtidos, a Figura 18-A apresenta o perfil da temperatura ao longo de toda a extensão do cabo, o qual foi obtido no dia 28 de fevereiro de 2015. Como referido anteriormente, cada ponto de medida corresponde à média dos valores da temperatura determinados pelas duas fibras do cabo óptico. Na Figura 18-B encontra-se o perfil da temperatura registado numa extensão de 250 m desse cabo, em dois dias separados por uma semana (20 e 28 de janeiro de 2015). Nessa figura apresentam-se também dois perfis de temperatura registados no mesmo dia (28 de janeiro, linhas laranja e cinzenta), que essencialmente não se distinguem, indicando a consistência de leitura do sistema, pois não se esperaria uma variação do perfil de temperatura da escombreira ao longo de um dia. Ao contrário do que é expectável, quando as medidas são realizadas com um intervalo temporal de uma semana (comparar a linha azul obtida a 20 de janeiro com as linhas laranja e cinza, verificando-se que a linha azul apresenta alguns picos não presentes nas outras duas).

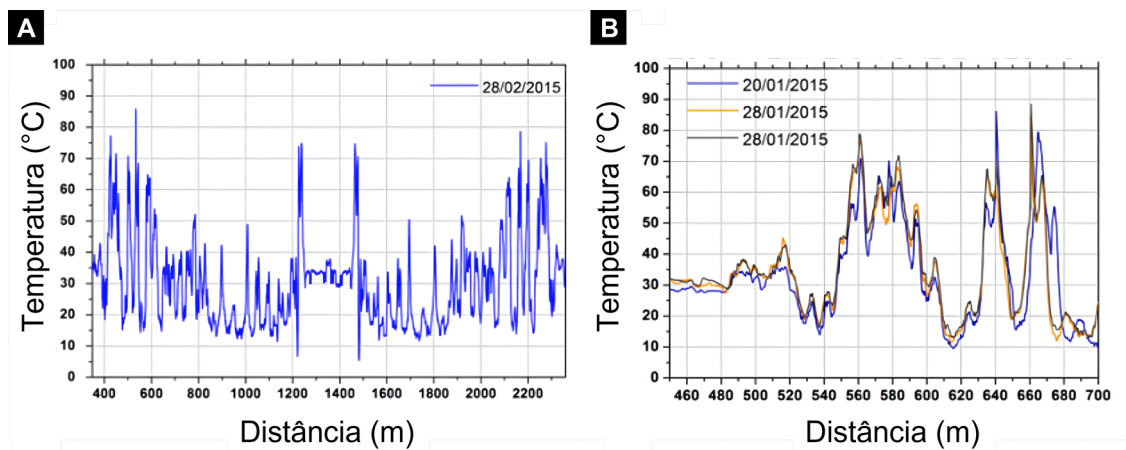


Figura 18 – (A) Perfil da temperatura ao longo do cabo de fibra óptica instalado na escombreira; (B) Ampliação relativa a uma extensão de 250 m do cabo, onde se mostra perfis de temperatura obtidos no mesmo dia (linhas laranja e cinzenta) e uma semana antes (linha azul) (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

Os dados apresentados na Figura 18 indicam os locais da escombreira onde a temperatura é superior a 80 °C e a profundidade a que se encontra o cabo. Modelos simples de transporte de calor permitem inferir a partir destes dados o aumento da temperatura em profundidade e a localização das zonas de combustão.

O padrão de combustão neste tipo de escombreiras é muito dinâmico, registando com frequência alterações não previsíveis. Isso foi observado num dos dois locais onde se pretendia colocar sensores para monitorizar a emissão de gases (o que se encontra indicado à direita na Figura 15-C), já que no período de poucos dias a temperatura aumentou para 270 °C (Figura 19-A), valor não compatível com

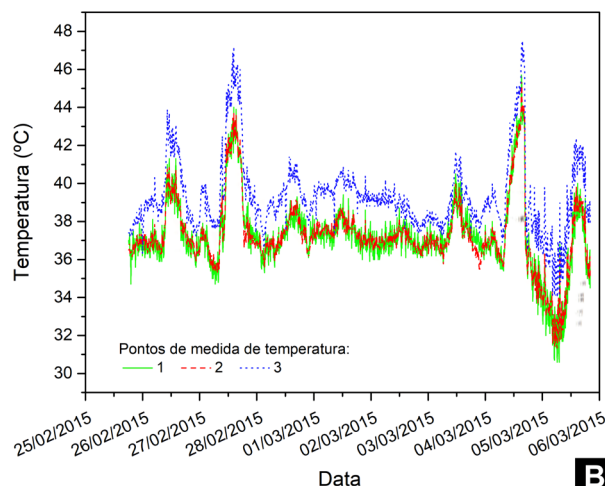
**A****B**

Figura 19 – (A) Medida termográfica da temperatura em um dos locais projetados de monitorização da emissão gasosa; (B) Evolução da temperatura no outro local de monitorização gasosa nas profundidades de 1,3 m (1), 1,4 m (2) e 1,5 m (3) (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

o funcionamento desses sensores. Assim, relativamente à emissão gasosa, o trabalho de campo ficou concentrado no outro local, que registava temperaturas muito inferiores, como indicado na Figura 19-B, que mostra a evolução da temperatura ao longo de 10 dias (de 25 de fevereiro a 5 de março de 2015) em três profundidades diferentes (1,3 m; 1,4 m e 1,5 m), sendo estes dados obtidos através de um sistema de medição da temperatura baseado em redes de Bragg, em fibra óptica. Verifica-se que, mesmo numa escala espacial reduzida (o local onde se instalou o sistema de sensores da emissão gasosa), está refletida a dinâmica do processo de combustão da escombreira, já que se regista uma variação da temperatura de ~ 18 °C no período considerado. A informação presente na Figura 19-B permite também concluir que, quando a profundidade aumenta 20 cm, a temperatura aumenta ~ 4 °C.

A informação adquirida com estes sistemas de monitorização da temperatura possibilitou a geração de mapas como os apresentados na secção 6.3, obtidos através da aplicação GIS-ECOAL. Um desses mapas encontra-se na Figura 20, que apresenta uma zona da escombreira onde a combustão era mais intensa (a parte indicada a vermelho nessa figura), assim como identifica o aumento da temperatura nas regiões aí referenciadas a amarelo, o que indica o aparecimento de novos focos de combustão nesses locais ao longo do período de monitorização.

Mapas deste tipo permitem, por um lado, obter uma perspetiva geral da dinâmica de combustão da escombreira e, por outro, obter informações precisas da temperatura na região coberta pelo cabo, à profundidade a que este foi instalado. Por exemplo, na Figura 20 estão referenciados três pontos da escombreira, sendo possível verificar que no ponto 1 se regista uma temperatura superior a 90 °C, no ponto 2 esta situa-se entre os 50 °C e os 60 °C, enquanto que no ponto 3 a temperatura encontra-se no intervalo 40 °C-50 °C.

Como já referido anteriormente, o cabo de deteção determina a temperatura ao longo do seu percurso de instalação, gerando uma malha de valores discretos, a qual é convertida num registo contínuo por uma extrapolação orientada pelos princípios da propagação de calor, que pode também, dentro de certos limites, ser expandida para criar planos de distribuição da temperatura a diferentes profundidades.

A monitorização da emissão de gases foi efetuada em dois locais previamente selecionados que apresentavam a temperatura mais baixa (indicado no lado esquerdo da Figura 15-C). Como já referido no contexto da Figura 19-B, observou-se nesta região da escombreira subidas significativas da temperatura que aconteciam em intervalos de tempo reduzidos, provavelmente associados a uma emissão gasosa substancial, pelo que a deteção e caracterização destas emissões certamente contribuirá para a determinação da dinâmica de combustão da escombreira.

Nesta localização, verificou-se ser residual a emissão de CH_4 e de CO_2 no período de 12 a 17 de março de 2015, o mesmo não acontecendo no que respeita à NH_3 . Como indicado na Figura 21-A, a

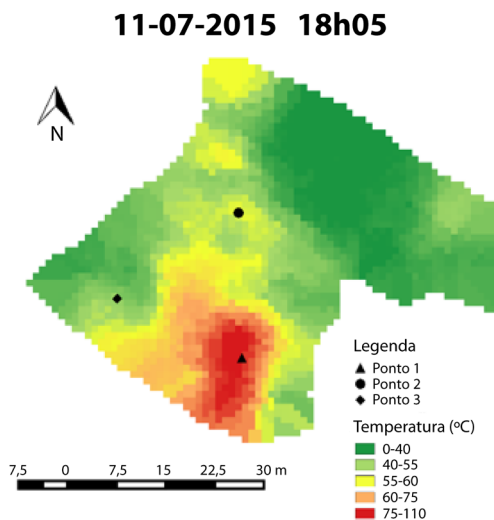


Figura 20 – Mapa da distribuição da temperatura ao longo da escombreira gerado pela aplicação GIS-ECOAL a partir da informação obtida pelo sistema óptico de monitorização da temperatura (adaptado de Duarte et al. 2017).

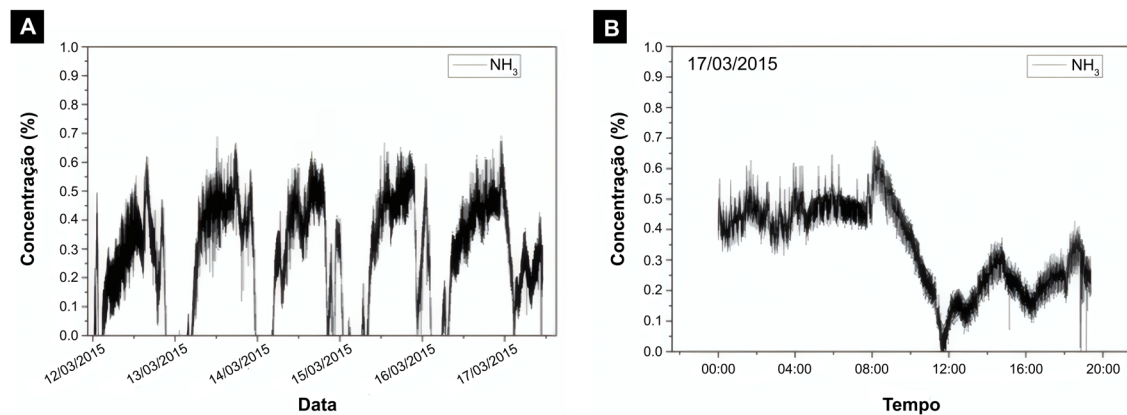


Figura 21 – (A) Evolução da emissão de NH_3 no período 12-17 de março de 2015 num dos dois locais selecionados para a monitorização de emissões gasosas (indicado no lado esquerdo da Figura 15-C); (B) Níveis de emissão de NH_3 no dia 17 de março (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

concentração (em volume) da NH_3 evidenciava uma acentuada variabilidade ao longo do dia, com períodos em que atingia os 0,6%-0,7%, diminuindo para valores residuais noutros períodos (Figura 21-B apresenta a variação da emissão de NH_3 ao longo de um dia do período de monitorização). Séries temporais mais longas são necessárias para caracterizar estas emissões e identificar os fatores nucleares que estão na sua origem.

Na arquitetura do sistema de deteção de emissões gasosas apresentado na Figura 16 é indicada uma abordagem alternativa baseada na utilização de fibras ópticas microestruturadas. Assim, no contexto do projeto ECOAL, várias destas fibras, duas delas apresentadas na Figura 22, foram projetadas, fabricadas e caracterizadas em laboratório. Os testes efetuados com estas fibras em condições reais de utilização revelaram que a pequena dimensão das entradas na fibra através das quais os gases fluem para o seu interior, assim como a reduzida extensão da região de interação destes gases com o campo óptico que se propaga na fibra, podem ser fatores limitativos para o desempenho adequado destas estruturas na monitorização das emissões gasosas. Desses estudos decorreram sugestões de como esses constrangimentos podem ser ultrapassados, tornando viável a sua utilização com vantagens acrescidas nas condições exigentes encontradas nas escombreyras em combustão.

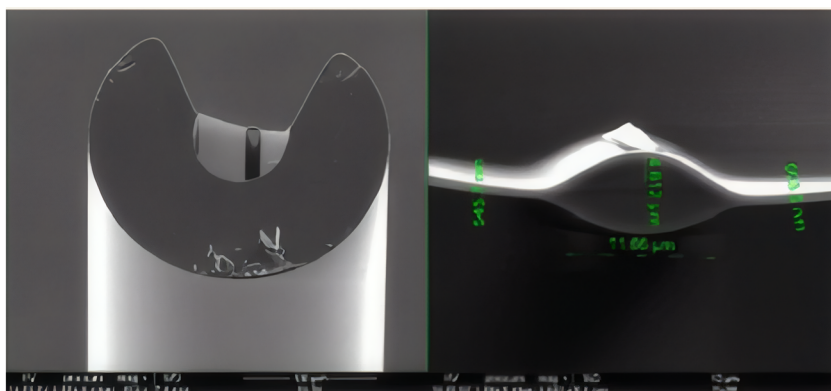


Figura 22 – Perspetivas da secção reta de duas fibras microestruturadas para deteção de gás (adaptado de Ribeiro et al. 2017).

6.2. Sistemas usando veículos aéreos não tripulados (VANT)

A monitorização ambiental é a base para a elaboração de relatórios ambientais e avaliações de impacto ambiental e pode ser efetuada considerando a recolha de dados *in situ*, ou através de sensores instalados em plataformas remotas, como seja, o exemplo dos veículos aéreos não tripulados (VANT). Este método de aquisição de dados, sejam eles de temperatura, topografia, uso e ocupação dos solos, ou outros, por sensores remotos tem-se mostrado muito adequado para a monitorização ambiental (Choe et al. 2008; Ferrier 1999), permitindo a recolha rápida de

informações espectrais de uma área mais extensa da superfície da Terra (Li et al. 2020). Os VANT podem ser usados em áreas relativamente pequenas, ao contrário dos sensores instalados em satélites de observação da Terra, que permitem monitorizar áreas mais extensas, mas possuem uma resolução espacial mais baixa (Soto-Estrada et al. 2018).

No âmbito do projeto *CoalMine*, foram realizados cinco voos de VANT entre 2019 e 2020, utilizando o sensor *Vue Pro R da FLIR Systems* (sensor térmico), instalado num *Phantom 4 Pro*. Os voos foram realizados próximo das 12 horas (UTC), a uma altitude entre os 100 m e os 140 m, com uma sobreposição longitudinal e lateral entre os 70 % e os 75 %, respetivamente, e em diferentes estações do ano, de forma a avaliar a influência da sazonalidade nos dados. Em cada campanha foi gerado um

ortomosaico térmico (Figura 23), que permitiu identificar uma zona na escombreira que apresentava consistentemente temperaturas mais elevadas, superiores a 50 °C. Os limites desta área são consistentes com observações *in situ* relativamente à libertação de gases, como resultado da autocombustão, e foram validados usando um termómetro de infravermelhos portátil. No entanto, esta metodologia é bastante influenciada pela temperatura atmosférica e pela exposição solar. Com temperaturas atmosféricas mais elevadas, a temperatura da escombreira pode ser mascarada pelos efeitos combinados da exposição solar e da temperatura atmosférica, que aumentam a temperatura da superfície do solo, pelo que, as medidas de temperatura obtidas, usando este tipo de

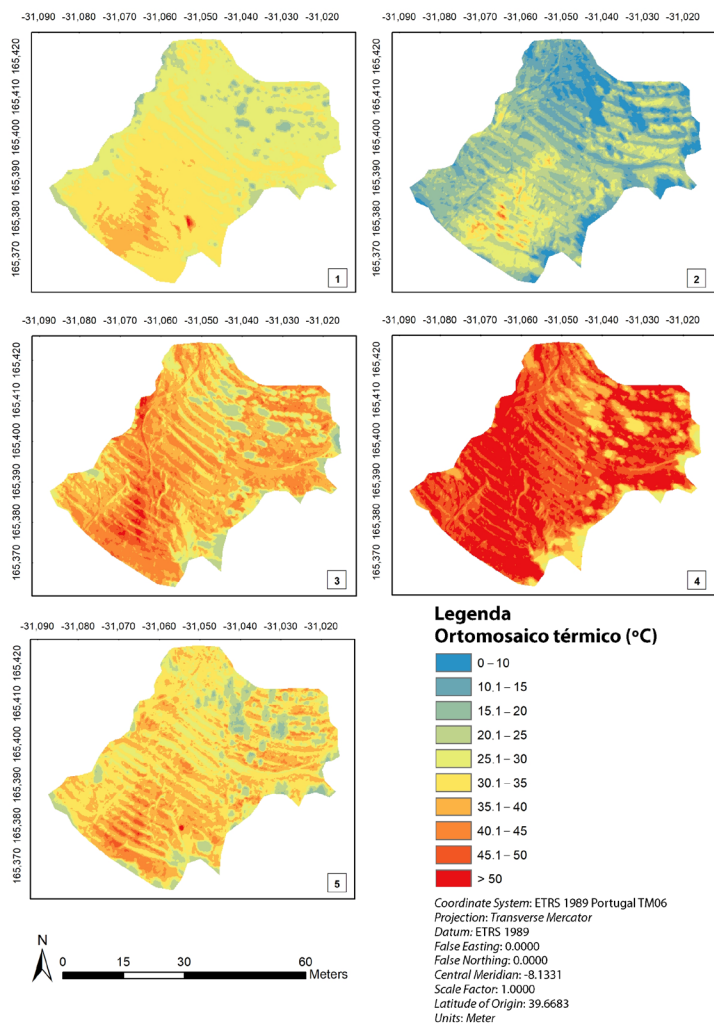


Figura 23 – Ortomosaico térmico para cada campanha realizada usando o VANT (°C) (1 – julho/2019; 2 – dezembro/2019; 3 – maio/2020; 4 – agosto/2020; 5 – novembro/2020) (Teodoro et al. 2021).

metodologia, devem ser evitadas em dias quentes e com intensa exposição solar.

Em cada campanha foi, também, gerado um modelo digital do terreno (MDT), através de uma cadeia de processamento fotogramétrico, usando os algoritmos internos do *software Agisoft Metashape*. Este programa permite a criação de nuvens de pontos, ortomosaicos, modelos digitais de superfície (MDS) e MDT, a partir dos dados registados pelo sensor *Micasense RedEdge* (RGB, “red edge” e NIR). O MDT pode ser usado para gerar subprodutos, tais como, o declive e a exposição.

Os dados multiespectrais do sensor RGB permitiram classificar as classes de uso e ocupação do solo (considerando algoritmos de classificação de imagem) e identificar a vegetação (através da aplicação de índices de vegetação). Como o local de estudo não apresenta uma grande variabilidade em termos de uso e ocupação do solo, o algoritmo de classificação usado (*K-means*) identificou apenas duas classes: solo e vegetação. As áreas classificadas como vegetação (valores maiores de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI); Rouse et al. 1973) correspondem às áreas que apresentaram temperaturas mais baixas (em todas as imagens). Foi, ainda, possível identificar alguma concordância entre as áreas com temperaturas mais elevadas e expostas a Sudeste, exceto aquelas com a presença de vegetação.

Concluindo, diferentes sensores acoplados a um VANT e diferentes produtos derivados foram usados com o objetivo de monitorizar a escombreira de São Pedro da Cova. A partir da análise da temperatura realizada concluiu-se que a temperatura da escombreira é influenciada diretamente pela temperatura do ar. No entanto, numa área com cerca de 200 m², junto à base da escombreira, a autocombustão ainda está ativa, atingindo temperaturas superficiais superiores a 50°C, independentemente da estação do ano e da temperatura do ar. A análise do uso e ocupação dos solos e da vegetação (NDVI) também permitiu concluir que a vegetação só aparece nas áreas com temperaturas mais baixas. Salienta-se, ainda, que a presença da vegetação é de extrema importância, pois contribui para minimizar a erosão do solo na escombreira, auxiliando no seu processo de estabilização.

6.3. Sistemas de informação geográfica

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) fornecem ferramentas que permitem sobrepor e combinar diferentes camadas de informação geoespacial, auxiliando a tomada de decisões (Lin et al. 2020). Os SIG são ferramentas adequadas para lidar com extensos conjuntos de dados obtidos utilizando diferentes métodos e técnicas, que geralmente são difíceis de integrar.

No âmbito do projeto ECOAL, de forma a monitorizar as variações da temperatura na escombreira de São Pedro da Cova, foi desenvolvida uma aplicação SIG *desktop* de código aberto (GIS-ECOAL), utilizando o *software QGIS*, que permitiu a criação de mapas dinâmicos de temperatura (Duarte et al. 2017). A identificação das temperaturas associadas ao processo de combustão e de eventuais

novos focos de combustão pode ser estimada a partir dos mapas gerados, contribuindo assim para a previsão de futuros cenários de evolução e, consequentemente, ajudar a estabelecer medidas de mitigação e práticas adequadas de gestão e monitorização.

No seguimento do projeto ECOAL e no âmbito do projeto *CoalMine*, foram adquiridos vários dados entre 2019 e 2021, através de metodologias distintas, nomeadamente campanhas *in situ* e dados de deteção remota obtidos, por exemplo com o VANT. Estes dados foram manipulados e integrados numa nova aplicação SIG de código aberto (no âmbito do *CoalMine*), desenvolvida no mesmo *software* referido anteriormente, que permitiu descrever a distribuição espacial dos contaminantes na área de estudo, assim como caracterizar os riscos ambientais e de saúde pública (Teodoro et al. 2021). A aplicação conecta-se a uma base de dados espacial que inclui dados relativos às amostras de água e de solos, mapas com as variações da temperatura, mapas com informação do relevo (MDT) e mapas de uso e ocupação do solo. A aplicação é dinâmica e permite aos utilizadores aceder facilmente a todos os dados do projeto para monitorizar os parâmetros ambientais através da criação de mapas de risco (Duarte et al. 2020). O código da aplicação está alojado no *GitHub* e está disponível em <https://github.com/liaduarte/Coal-Mine-Project.git>.

Além da monitorização ambiental da escombreira de São Pedro da Cova, a identificação de potenciais impactes nas áreas circundantes é de extrema relevância, sobretudo nos solos e nas águas em redor da escombreira (Ribeiro e Flores 2021; Ribeiro et al. 2010a,b). Assim, com vista à determinação da suscetibilidade à contaminação nas áreas da região envolvente da escombreira, elaborou-se uma análise multicritério, usando os seguintes parâmetros: área da escombreira mineira (fonte de contaminação); área de escorrência superficial a partir da escombreira e das instalações mineiras; áreas de drenagem e respetivos cursos de água a jusante da mina e dos pontos de descarga das galerias de drenagem mineira (transporte de contaminantes por via aquática); distância euclidiana à escombreira (transporte de contaminantes por via aérea); e índice de vegetação (NDVI).

Através dos mapas gerados, foi possível concluir que a suscetibilidade à contaminação é mais elevada na envolvente da mina abandonada, principalmente ao longo das pilhas de resíduos e nas correspondentes áreas de escoamento. Também se verificou que a contaminação pode ser crucial na drenagem ao longo da rede hidrográfica proveniente da escombreira e dos efluentes de descarga da mina já que essas áreas são cercadas por campos agrícolas que podem ser afetados por contaminantes e onde a água pode ser potencialmente usada para irrigação. O resultado é crucial para entender como as áreas ao redor da escombreira podem ser afetadas negativamente pelos contaminantes da mesma.

Esta informação e toda a restante obtida no âmbito do projeto *CoalMine*, entre 2019 e 2021, tais como a caracterização hidrogeoquímica dos solos, amostras de água, MDT, mapas de declive e orientação, assim como mapas de variação de temperatura, foi incorporada numa aplicação webSIG, que constitui uma interface de interação com o utilizador, permitindo a visualização

de dados geográficos (Figura 24). O webSIG desenvolvido é de acesso livre ao público em geral, assim como a entidades públicas e investigadores e encontra-se disponível em <https://gis.fc.up.pt/coalmine>. O webSIG pode ser considerado como uma base para a gestão e monitorização adequadas da escombreira de São Pedro da Cova, além de ser uma ferramenta para a divulgação dos dados adquiridos e gerados através de múltiplas técnicas, além de não requerer conhecimento sobre nenhum *software* ou base de dados espaciais e poder ser adaptado para outras regiões.

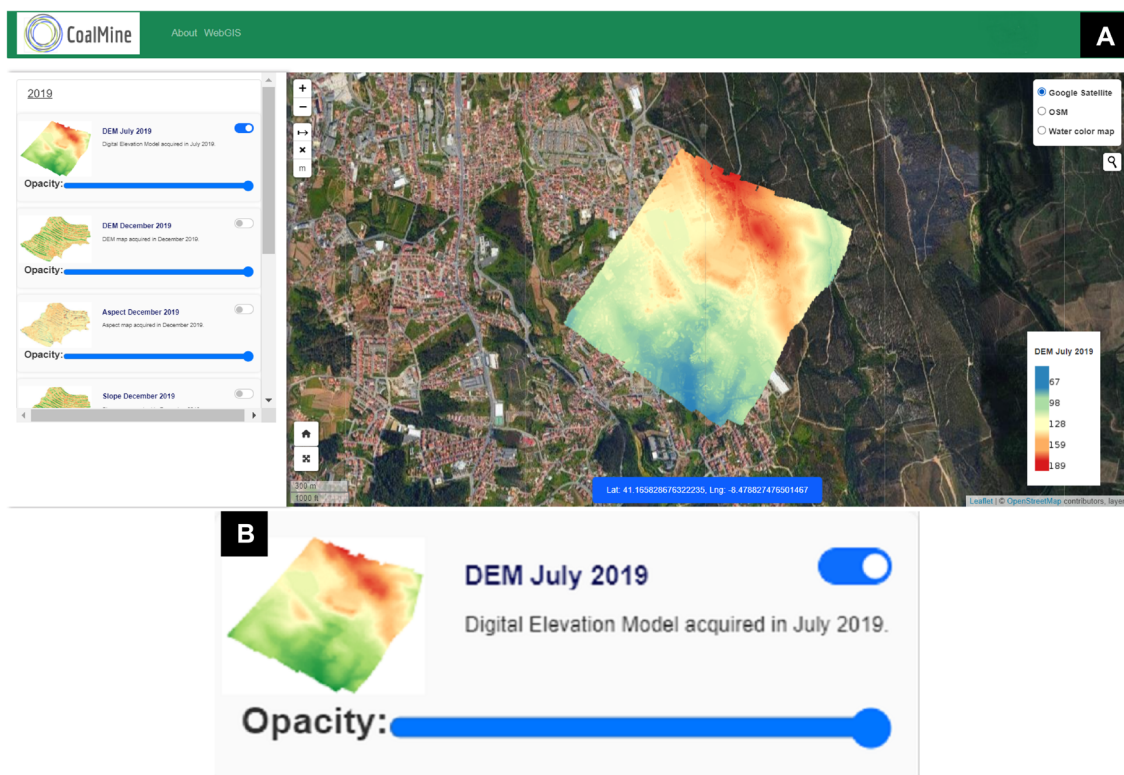


Figura 24 – (A) Aplicação WebSIG; (B) Detalhe da funcionalidade onde o mapa pode ser ligado/desligado.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo integrado das escombreiras em autocombustão na BCD, com vista à monitorização ambiental, foi realizado através de uma abordagem transdisciplinar com contributos quer científicos quer sociais para a sustentabilidade ambiental e social. Integrou equipas de várias áreas das ciências, nomeadamente Geologia, Física, Engenharia Geográfica e Química. Esta abordagem permitiu contribuir para o avanço do conhecimento sobre os materiais das escombreiras resultantes da acumulação de rejeitados mineiros da exploração do carvão e sobre os efeitos da autocombustão destes materiais na qualidade do ar, da água e dos solos envolventes.

Os estudos realizados no âmbito dos projetos desenvolvidos em São Pedro da Cova permitiram

a publicação de um conjunto muito alargado de trabalhos em revistas internacionais e nacionais, bem como apresentações em congressos. Foi, também, um contributo importante para a formação graduada e pós-graduada dos estudantes da Universidade do Porto, através da sua participação no âmbito da unidade curricular de Estágio, assim como no desenvolvimento de teses de mestrado e de doutoramento.

O desenvolvimento dos projetos, assim como os trabalhos de desenvolvimento das teses foram sempre realizados em estreita colaboração com a autarquia e a proteção civil quer no apoio logístico dos trabalhos de campo, neste caso, de particular importância, uma vez que a região foi sempre o “laboratório” por excelência, quer na disseminação dos resultados obtidos como contribuição para o estabelecimento de medidas preventivas e de mitigação dos efeitos na população local.

Por último, refere-se a preocupação sempre presente no espírito das equipas envolvidas em divulgar os resultados à comunidade local e estudantil através, por exemplo, do Projeto Eco-Escolas e o envolvimento na organização de *workshops* e palestras de divulgação dos resultados obtidos à comunidade científica e, ainda, na consciencialização dos responsáveis das autarquias locais e população em geral.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos projetos ECOAL – MGT – SOE3/P2/P714, Ecological Management of Coal Waste Piles in Combustion, SUDOE – Interreg IV B; e, CoalMine - Coal Mining wastes: assessment and reclamation of environmental impacts through remote sensing and geostatistical analysis (Ref. POCI-01-0145-FEDER-030138, 02-SAICT-2017). As atividades destes projetos estão enquadradas nas atividades do GI3 do ICT (UIDB/04683/2020 e UIDP/04683/2020).

REFERÊNCIAS

- APA (Agência Portuguesa do Ambiente), 2019. *Solos Contaminados – Guia Técnico, Valores de Referência para o Solo*. Agência Portuguesa do Ambiente. Lisboa, 72p.
- Avila, C., Wu, T., e Lester, E., 2014. Petrographic characterization of coals as a tool to detect spontaneous combustion potential. *Fuel* 125(2): 173-182. doi: 10.1016/j.fuel.2014.01.042
- Ayers, R.S., e Westcot, D.W., 1994. Water quality for agriculture. In: *Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. Rome, Italy, 97p.
- Bao, X., Zhou, Z., e Wang, Y., 2021. Review: distributed time-domain sensors based on Brillouin scattering and FWM enhanced SBS for temperature, strain and acoustic wave detection. *PhotonIX* 2(1): 14. doi: 10.1186/s43074-021-00038-w
- Beamish, B.B., e Arisoy, A., 2008. Effect of mineral matter on coal self-heating rate. *Fuel* 87(1): 125-130. doi: 10.1016/j.fuel.2007.03.049
- Çelebi, E.E., e Ribeiro, J., 2023. Prediction of acid production potential of self-combusted coal mining wastes from Douro Coalfield (Portugal) with integration of mineralogical and chemical data. *International Journal of Coal Geology* 265(5): 104152. doi: 10.1016/j.coal.2022.104152

- Chakraborty, A.L., e Roy, A., 2021. Wavelength Modulation Spectroscopy. In: *Modern Techniques of Spectroscopy. Basics, Instrumentation, and Applications*. Editado por D.K. Singh, M. Pradhan, e A. Materny. Progress in Optical Science and Photonics. Singapore: Springer 13: 321-362. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6084-6_13
- Choe, E., der Meer, F., Ruitenbeek, F., der Werff, H., Smeth, B., e Kim, K., 2008. Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain. *Remote Sensing of Environment* 112(7): 3222-3233. doi: 10.1016/j.rse.2008.03.017
- Correia, P., Šimůnek, Z., Sá, A.A., e Flores, D., 2018. A new Late Pennsylvanian floral assemblage from the Douro Basin, Portugal." *Geological Journal* 53(6): 2507-2531. doi: 10.1002/gj.3086
- Costa, M.I.M., 2021. *Assinatura Geoquímica das Metantracites da Bacia Carbonífera do Douro*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Tese de Mestrado, 140p. (Tese de Mestrado).
- Costa, M., Moura, H., Pinto de Jesus, A., Suárez-Ruiz, I., e Flores, D., 2022. Effects of Magmatic Fluids in Coals of São Pedro da Cova Coalfield, Douro Carboniferous Basin, Portugal: Insights from Inorganic Geochemistry. *Minerals* 12(2): 275. doi:10.3390/min12020275
- Domingos, L.C.G., Freire, J.L., Silva, F.G., Gonçalves, F., Pereira, E., e Ribeiro, A., 1983. The structure of the intramontane Upper Carboniferous basins in Portugal. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Lisboa: Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal, Volume 29, pp. 187-194.
- Duarte, L., Teodoro, A.C., Fernandes, J., Santos, P., e Flores, D., 2020. An Integrated Environmental Monitoring Approach through the Development of Coal Mine, a GIS Open Source Application. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2020)*. Editado por C. Grueau, R. Laurini e L. Ragia. SCITEPRESS – Science and Technology Publications, Lda., pp. 286-293.
- Duarte, L., Teodoro, A.C., Gonçalves, J.A., Ribeiro, J., Flores, D., Lopez-Gil, A., Dominguez-Lopez, A., Angulo-Vinuesa, X., Martin-Lopez, S., e Gonzalez-Herraez, M., 2017. Distributed Temperature Measurement in a Self-Burning Coal Waste Pile through a GIS Open Source Desktop Application. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(3): 87. doi: 10.3390/ijgi6030087
- Duarte, L., Teodoro, A.C., Santos, P., Almeida, C.R., Cardoso-Fernandes, J., e Flores, D., 2022. An Interactive WebGIS Integrating Environmental Susceptibility Mapping in a Self-Burning Waste Pile using a Multi-Criteria Decision Analysis Approach. *Geosciences* 12(10): 352. doi: 10.3390/geosciences12100352
- Eagar, R.M.C., 1983. The non-marine bivalve fauna of the Stephanian C of North Portugal. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Lisboa: Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal, Volume 29, pp. 179-185.
- Espinha Marques, J., Martins, V., Santos, P., Ribeiro, J., Mansilha, C., Melo, A., Rocha, F., e Flores, D., 2021. Changes Induced by Self-Burning in Technosols from a Coal Mine Waste Pile: A Hydropedological Approach. *Geosciences* 11(5): 195. doi: 10.3390/geosciences11050195
- Ferrier, G., 1999. Application of Imaging Spectrometer Data in Identifying Environmental Pollution Caused by Mining at Rodaquilar, Spain. *Remote Sensing of Environment* 68(2): 125-137. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00105-9
- Finkelman, R.B., 2004. Potential health impacts of burning coal beds and waste banks. *International Journal of Coal Geology* 59(1-2): 19-24. doi: 10.1016/j.coal.2003.11.002
- Gentzis, T., e Goodarzi, F., 1989. Organic Petrology of a self-burning coal wastepile from Coleman, Alberta, Canada. *International Journal of Coal Geology* 11(3-4): 257-271. doi: 10.1016/0166-5162(89)90118-3
- Gombert, P., Sracek, O., Koukouzas, N., Gzyl, G., Valladares, S.T., Frączek, R., Klinger, C., Bauerek, A., Areces, J.E.A., Chamberlain, S., Paw, K., e Pierzchała, Ł., 2019. An Overview of Priority Pollutants in Selected Coal Mine Discharges in Europe. *Mine Water and the Environment* 38(1): 16-23. doi: 10.1007/s10230-018-0547-8

- Hageman, P.L., 2007. *U.S. Geological Survey Field Leach Test for Assessing Water Reactivity and Leaching Potential of Mine Wastes, Soils, and Other Geologic and Environmental Materials*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 5, Chapter 3, 14p. <https://doi.org/10.3133/tm5D3>
- Hedin, R., Weaver, T., Wolf, N., e Watzlaf, G., 2013. *Tratamento Passivo Eficaz de Drenagem de Minas de Carvão*. Documento apresentado na 35.^a Conferência Anual da Associação Nacional de Programas de Terras de Minas Abandonadas.
- ISO 11760, 2018. *Classification of coals*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2.^a Edição, 9p.
- IUSS Working Group WRB, 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), World Soil Resources Reports, N.º 106, 192p.
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., e Bourrié, G., 2019. Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. *Water* 11(2): 361. doi: 10.3390/w11020361
- Kim, A.G., 2011. Chapter 1 – Coal Formation and the Origin of Coal Fires. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Volume 1: Coal-Geology and Combustion*. Editado por Glenn B. Stracher, A. Prakash e Ellina V. Sokol. Elsevier, pp. 1-28. doi: 10.1016/B978-0-444-52858-2.00001-3
- Lemos de Sousa, M.J., 1973. *Contribuição para o Conhecimento da Bacia Carbonífera do Douro*. Universidade do Porto, 427p. (Tese de Doutoramento).
- Lemos de Sousa, M.J., 1978. O grau de incarbonização (*rang*) dos carvões durienses e as consequências genéticas, geológicas e estruturais que resultam do seu conhecimento. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal* 63: 179–365.
- Lemos de Sousa, M.J., 1979. Subsídios para o conhecimento da matéria mineral associada às perantracites da Bacia Carbonífera do Douro (NO Portugal). II—Elementos para o estudo geoquímico das perantracites durienses. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal* 64: 99–102.
- Li, J., Pei, Y., Zhao, S., Xiao, R., Sang, X., e Zhang, C., 2020. A Review of Remote Sensing for Environmental Monitoring in China. *Remote Sensing* 12(7): 1130. doi: 10.3390/rs12071130
- Lin, Y., Hoover, J., Beene, D., Erdei, E., e Liu, Z., 2020. Environmental risk mapping of potential abandoned uranium mine contamination on the Navajo Nation, USA, using a GIS-based multi-criteria decision analysis approach. *Environmental Science and Pollution Research* 27(24): 30542–30557. doi: 10.1007/s11356-020-09257-3
- Liu Simon, Z.S., Huang, C., Ma, L., Dy, E., Xie, Z., Tufa, K., Fisher, E.A., Zhou, J., Morin, K., Aziz, M., Meints, C., O’Kane, M., e Tallon, L., 2019. The characteristic properties of waste rock piles in terms of metal leaching. *Journal of Contaminant Hydrology* 226(42205): 103540. doi: 10.1016/j.jconhyd.2019.103540
- Loureiro, J.P., Correia, P., Nel, A., e Pinto de Jesus, A.P., 2010. *Lusitaneura Covensis* n. gen., n. sp., first Caloneuroidea from the Carboniferous of Portugal (Insecta: Pterygota: Panorthoptera). *Annales de la Société entomologique de France* 46(1-2): 242–246. doi: 10.1080/00379271.2010.10697664
- Mansilha, C., Melo, A., Flores, D., Ribeiro, J., Rocha, J.R., Martins, V., Santos, P., e Espinha Marques, J., 2021. Irrigation with Coal Mining Effluents: Sustainability and Water Quality Considerations (São Pedro da Cova, North Portugal). *Water* 13(16): 2157. doi: 10.3390/w13162157
- Mastalerz, M., Drobniak, A., Hower, J.C., e O’Keefe, J., 2011. Chapter 3 –Spontaneous Combustion and Coal Petrology. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Volume 1: Coal – Geology and Combustion*. Editado por Glenn B. Stracher, A. Prakash e Ellina V. Sokol. Elsevier, pp. 47-62. doi: 10.1016/B978-0-444-52858-2.00003-7
- Medeiros, A.C., Pereira, E., e Moreira, A., 1980. *Notícia Explicativa da Folha 9-D Penafiel da Carta Geológica de Portugal à Escala 1:50 000*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- METER Group, 2020. *Mini Disk Infiltrimeter*. USA: Meter Group, Inc., 16p.
- Misz-Kennan, M., e Fabiańska, M.J., 2011. Application of organic petrology and geochemistry to coal waste studies. *International Journal of Coal Geology* 88(1): 1–23. doi: 10.1016/j.coal.2011.07.001
- Misz-Kennan, M., Kus, J., Flores, D., Avila, C., Büçkün, Z., Choudhury, N., Christanis, K., Joubert, J.P.,

- Kalaïtzidis, S., Karayigit, A.I., Malecha, M., Marques, M., Martizzi, P., O'Keefe, J.M.K., Pickel, W., Predeanu, G., Pusz, S., Ribeiro, J., Rodrigues, S., Singh, A.K., e Životić, D., 2020. Development of a petrographic classification system for organic particles affected by self-heating in coal waste. (An ICCP Classification System, Self-Heating Working Group – Commission III). *International Journal of Coal Geology* 220(6): 103411. doi: 10.1016/j.coal.2020.103411
- Morozov, O.G., 2021. Fiber Bragg Grating-Based Sensors and Systems. *Sensors* 21(24):8225. doi: 10.3390/s21248225
- Moura, H., Pinto de Jesus, A., Ribeiro, J., Suárez-Ruiz, I., Flores, D., e Cunha, P.P., 2018. Occurrence of Mercury and enrichment source in coals from the Douro Carboniferous Basin, São Pedro da Cova area (NW Portugal). In: *Proceedings of the 70th Annual Meeting of the International Committee for Coal and Organic Petrology*. Brisbane, Australia, September 2018, pp. 71–72.
- Pinto de Jesus, A.D., 2003. Sedimentary and tectonic evolution of the Douro coalfield basin (Lower Stephanian C, NW Portugal). *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico De Laxe* 28: 107-125.
- Pinto de Jesus, A., 2019. Carboniferous Intermontane Basins of Portugal. In: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*. Editado por Cecilio Quesada e José Tomás Oliveira. Springer Nature Switzerland AG, Cham, 1.^a Edição, Volume 2: Synorogenic Basins, pp. 402–408.
- Pone, J.D.N., Hein, K.A.A., Stracher, G.B., Annegarn, H.J., Finkleman, R.B., Blake, D.R., McCormack, J.K., e Schroeder, P., 2007. The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology* 72(2): 124-140. doi: 10.1016/j.coal.2007.01.001
- Potter, H., Johnston, D., Jones, C., Rolley, S., Watson, I., e Pritchard, J., 2009. Abandoned Mines and the Water Environment in the UK. In: *Securing the Future and 8th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*. International Network for Acid Prevention, Skellefteå, Sweden, p. 1532.
- Ribeiro, J., e Flores, D., 2021. Occurrence, leaching, and mobility of major and trace elements in a coal mining waste dump: The case of Douro Coalfield, Portugal. *Energy Geoscience* 2(2): 121-128. doi: 10.1016/j.engeos.2020.09.005
- Ribeiro, J.P.M., 2011. *Characterization of Geological Materials Resulting from Douro Coalfield Coal Mining and Consumption – Potential Environmental Impacts*. Universidade do Porto. (Tese de Doutoramento).
- Ribeiro, J., Viveiros, D., Ferreira, J., Lopez-Gil, A., Dominguez-Lopez, A., Martins, H.F., Perez-Herrera, R., Lopez-Aldaba, A., Duarte, L., Pinto, A., Martin-Lopez, S., Baierl, H., Jamier, R., Rougier, S., Auguste, J., Teodoro, A.C., Gonçalves, J.A., Esteban, O., Santos, J.L., Roy, P., Lopez-Amo, M., Gonzalez-Herraez, M., Baptista, J.M., e Flores, D., 2017. ECOAL Project-Delivering Solutions for Integrated Monitoring of Coal-Related Fires Supported on Optical Fiber Sensing Technology. *Applied Sciences* 7(9): 956. doi: 10.3390/app7090956
- Ribeiro, J., Ferreira da Silva, E., e Flores, D., 2010a. Burning of coal waste piles from Douro Coalfield (Portugal): Petrological, geochemical and mineralogical characterization. *International Journal of Coal Geology* 81(4): 359-372. doi: 10.1016/j.coal.2009.10.005
- Ribeiro, J., Ferreira da Silva, E., Pinto de Jesus, A., e Flores, D., 2011. Petrographic and geochemical characterization of coal waste piles from Douro Coalfield (NW Portugal). *International Journal of Coal Geology* 87(3-4): 226-236. doi: 10.1016/j.coal.2011.06.014
- Ribeiro, J., Ferreira da Silva, E., Li, Z., Ward, C., e Flores, D., 2010b. Petrographic, mineralogical and geochemical characterization of the Serrinha coal waste pile (Douro Coalfield, Portugal) and the potential environmental impacts on soil, sediments and surface waters. *International Journal of Coal Geology* 83(4): 456-466. doi: 10.1016/j.coal.2010.06.006
- Ribeiro, J., Sant'Ovaia, H., Gomes, C., Ward, C., e Flores, D., 2015. Mineralogy and Magnetic Parameters of Materials Resulting from the Mining and Consumption of Coal from the Douro Coalfield, Northwest Portugal. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Volume 3: Case Studies – Coal Fires*. Editado por Glenn

- B. Stracher, A. Prakash e Ellina V. Sokol. Elsevier, pp. 494-508. doi: 10.1016/B978-0-444-59509-6.00018-1
- Ribeiro, J., Suárez-Ruiz, I., e Flores, D., 2022. Coal related fires in Portugal: New occurrences and new insights on the characterization of thermally affected and non-affected coal waste piles. *International Journal of Coal Geology* 252(5): 103941. doi: 10.1016/j.coal.2022.103941
- Ribeiro, J., Moura, R., Flores, D., Lopes, D.B., Gouveia, C., Mendonça, S., e Frazão, O., 2013. The Douro Coalfield Fires of Portugal. In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Volume 2: Photographs and Multimedia Tours*. Editado por Glenn B. Stracher, A. Prakash e Ellina V. Sokol. Elsevier, pp. 313-337. doi: 10.1016/B978-0-444-59412-9.00016-8
- Ribeiro, J., Silva, T., Mendonça Filho, J.G., e Flores, D., 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in burning and non-burning coal waste piles. *Journal of Hazardous Materials* 199-200: 105-110. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.076
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., e Deering, D.W., 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Texas: NASA, Goddard Space Flight Center, 3rd ERTS-1Symp., Volume 1, Sect. A, pp. 309-317.
- Santos, J.L., e Farahi, F., 2014. *Handbook of Optical Sensors*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 1.^a Edição, 718p. doi: 10.1201/b17641
- Santos, P., Ribeiro, J., Espinha Marques, J., e Flores, D., 2023a. Environmental and Health Risk Assessment of Soil Adjacent to a Self-Burning Waste Pile from an Abandoned Coal Mine in Northern Portugal. *Environments* 10(3): 53. doi: 10.3390/environments10030053
- Santos, P., Espinha Marques, J., Ribeiro, J., Mansilha, C., Melo, A., Fonseca, R., Sant'Ovaia, H., e Flores, D., 2023b. Geochemistry of Soils from the Surrounding Area of a Coal Mine Waste Pile Affected by Self-Burning (Northern Portugal). *Minerals* 13(1): 28. doi: 10.3390/min13010028
- Soto-Estrada, E., Correa-Echeverri, S., e Posada-Posada, M.I., 2018. Thermal analysis of urban environments in Medellin, Colombia, using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of Urban and Environmental Engineering* 11(2): 142-149. doi: 10.4090/juee.2017.v11n2.142149
- Stracher, Glenn B., 2007. *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World*. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology XVIII, 283p. doi: <https://doi.org/10.1130/REG18>
- Suárez-Ruiz, I., e Crelling, J.C., 2008. *Applied Coal Petrology: The Role of Petrology in Coal Utilization*. Elsevier, Academic Press, 388p. doi: 10.1016/B978-0-08-045051-3.X0001-2
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Mendonça Filho, J.G., e Hackley, P.C., 2012. Review and update of the applications of organic petrology: Part 2, geological and multidisciplinary applications. *International Journal of Coal Geology* 98(9): 73-94. doi: 10.1016/j.coal.2012.03.005
- Teodoro, A., Santos, P., Espinha Marques, J., Ribeiro, J., Mansilha, C., Melo, A., Duarte, L., Rodrigues de Almeida, C., e Flores, D., 2021. 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* 8(6): 48. doi: 10.3390/environments8060048
- Wagner, R., e Lemos de Sousa, M.J., 1983. The Carboniferous Megafloras of Portugal – A revision of identifications and discussion of stratigraphic ages. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J. Tomás de Oliveira. Lisboa: Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal, Volume 29, pp. 127-152.
- Zhang, Y., Yang, W., Han, D., e Kim, Y., 2014. An Integrated Environment Monitoring System for Underground Coal Mines – Wireless Sensor Network Subsystem with Multi-Parameter Monitoring. *Sensors* 14(7): 13149-13170. doi: 10.3390/s140713149

CO₂ Geological storage in coal: Risk Assessment

L. RIBEIRO E SOUSA¹, R. LEAL E SOUSA², ZHANG RU³ AND EURÍPEDES VARGAS JR.⁴

¹ Department of Civil Engineering, University of Porto. Porto, Portugal

² New York University. Abu Dhabi, UAE

³ Sichuan University. Chengdu, China

⁴ Catholic University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brazil

* E-mail: sousa-scu@hotmail.com

ABSTRACT

Risk assessment in storage of CO₂ in coal is analyzed, with particular emphasis on cases where the injection is made into unminable coal seams and in abandoned coal mines. The risks associated are studied in detail, different types of hazard scenarios are identified and described. The importance of modelling and monitoring is emphasized to prevent risks, and different technologies and methodologies are described. For risk assessment there are several models available for data analysis and representation, including event trees, rule-based systems, fuzzy-rule based systems, artificial neural networks, and Bayesian networks (BN). In the chapter several models are described, and common techniques for risk assessment are presented. The fundamentals of BN and decision graphs are introduced. Some applications concerning the risk assessment of CO₂ injection processes and storage in carboniferous formations are illustrated and analyzed using BN for different hazard scenarios. Finally, several conclusions are drawn.

Key-words: Risk Assessment, CO₂ Storage, Coal Seams, Abandoned Coal Mines.

RESUMO

A análise de risco envolvendo a armazenagem de CO₂ no carvão é analisada, com ênfase particular em casos em que a injeção é aplicada em formações carboníferas não minadas e em minas de carvão abandonadas. Os riscos associados são estudados em detalhe, e os diferentes tipos de cenários de risco são identificados e descritos. É descrita e enfatizada a importância da modelação e da monitorização de forma a prevenir riscos e são descritas diferentes metodologias. Para a análise de risco, existem vários modelos disponíveis para análise de dados e sua representação, incluindo árvores de eventos, sistemas baseados em conhecimento, sistemas baseados em regras fuzzy, redes neuronais artificiais, e redes Bayesianas (BN). Neste artigo, são descritos vários modelos e apresentadas técnicas habituais para avaliação de risco. São introduzidos os fundamentos das BN e dos gráficos de decisão. Algumas aplicações relativas à análise de risco de processos de injeção e de armazenagem de CO₂ em formações carboníferas

são ilustradas e analisadas com base em BN para diferentes cenários de perigo. Finalmente, algumas conclusões são apresentadas.

Palavras-chave: Avaliação do risco, Armazenamento de CO₂, Camadas de carvão, Minas de carvão abandonadas.

1. INTRODUCTION

Storage of CO₂ in deep onshore, and offshore geological formations, uses many of the technologies developed by oil and gas industry and has been proved to be economically feasible under specific conditions in oil and gas fields, and in conjunction with enhanced oil recovery (EOR) and enhanced gas recovery (EGR), and in saline aquifers (IPCC 2005; EASAC 2013; Ciotta 2019, 2022; Zhacarias et al. 2022).

CO₂ can also be stored in coal beds, in unminable deep coal seams and well-sealed abandoned coal mines. CO₂ should be safely injected and stored at well characterized and properly managed sites to assure the long-term safety of a geologic CO₂ storage project.

Injecting carbon dioxide in deep geological formations, CO₂ can be stored in appropriate conditions of pressure and temperature in order that so-called supercritical or liquid form are possible, requiring less volume than in its gaseous form (EASAC 2013). It is necessary that the planned facilities provide adequately safe storage, which means there will be no leakage of CO₂ during the storage period. At depths below about 800-1000, CO₂ has a liquid-like density that allows for the efficient use of the underground reservoirs in porous sedimentary rocks.

Geological storage requires constructing facilities to capture large emission sources of CO₂ such as power plants for electricity production or cement, steel, ethanol plants, among others. Nowadays, there are under development diverse alternative methods aiming to remove CO₂ before combustion. The captured CO₂ is then transported by pipelines or in ships, to underground storage sites. Most of the mechanisms related to this technology are not new, since they are already employed by the oil industry.

The concept of CO₂ storage in abandoned underground coal mines provides a new way that can be very important in countries like China with many abandoned coal mines (He 2012; Piessens 2012). Different types of underground space can be considered in abandoned coal mines, such include permanent spaces (shafts, underground chambers and permanent roadways) and working faces.

The environmental impact caused by geological storage of CO₂ can be integrated into two types of categories, i.e. local environmental effects and global effects from the release of stored CO₂ to the atmosphere (Hosseini et al. 2013; IEA 2016, 2019; IPCC 2018). Global effects may be viewed as uncertainty in the effectiveness of CO₂ storage. Local hazards arise from causes like direct effects of high gas-phase CO₂ concentrations in the shallow surface or near surface, effects

of dissolved CO₂ on groundwater and effects caused by displacement of fluids by the injected CO₂ (Sousa and Sousa 2012; Rutqvist 2012; Conney et al. 2015).

There are different potential escape routes for CO₂ injected into geological formations. Risk assessment should be an integral element of risk management activities, like site selection, site characterization, storage system, design, monitoring and if necessary, remediation. There are already several well-functioning CO₂ storage operations, in depleted gas and oil reservoirs and in saline aquifers as illustrated in several publications (IPCC 2005; Sousa 2012a; EASAC 2013). The major issues to be considered are related to risks of leakage and the impact on the environment and with safety, as a result of pressure build-up caused by the injection of CO₂, and the possibility of induced seismicity and long-range impacts. The different risks will be analyzed, particularly those related to storage in unminable coal seams and abandoned coal mines.

The methodology to be developed for risk assessment will use BN. BN is a graphical representation of knowledge for reasoning under uncertainty and has become a popular representation for encoding uncertain expert knowledge in expert system. BN can be used at any stage of risk analysis, and provides a good tool for decision analysis. Furthermore, they can be extended to influence diagrams, including decision and utility nodes to explicitly model a decision problem (Sousa 2012b).

In 2010 the State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering from China University of Mining and Technology, Beijing, was awarded a project on the field of risk assessment of CO₂ injection and sequestration in carboniferous reservoirs by the State Administration of Foreign Experts Affairs, from China. The importance of the project was because China is the major coal producer, with increasing and sustained economic development. China is now the world's largest emitter of greenhouse gases. Therefore, there are several possibilities for selecting appropriate sites for reservoirs, including abandoned coal mines. Coal formations contain cleats that impart some permeability to the system. Between cleats, coal has many micropores into which gas molecules can diffuse and be tightly absorbed. CO₂ injected through wells will flow through the cleat system, diffuse in the coal matrix and will be absorbed onto the coal micropore surfaces. If CO₂ is injected into coal seams it can displace gas methane enhancing coal bed methane recovery.

This chapter presents in Section 2 technical aspects of injection and safety storage in carboniferous formations. The available space in coal formations is analyzed, as well as in abandoned coal mines. In Section 3 the risk assessment and risk concepts are referred followed by a review and discussion of known hazards for carbon sequestration. Analysis of preventing risks, by modelling and monitoring, is described in Section 4. The development of methodologies is outlined for different hazard scenarios in Section 5, with special emphasis on the use of BNs. Some illustrative applications are presented. Finally, some conclusions are drawn and presented in the last section.

2. CO₂ INJECTION AND SAFETY STORAGE IN CARBONIFEROUS FORMATIONS

CO₂ injection and sequestration in carboniferous reservoirs can be performed either in deep unminable coal seams or in abandoned coal mines. Coal formations contain cleats that impart some permeability to the system. Besides cleats, coal has many micropores into which gas molecules can diffuse and be absorbed. Gaseous CO₂ injected through wells will flow through the cleat system, will diffuse to the coal matrix and will be absorbed onto the coal micropore surfaces (Figure 1). The cleat spacing ranges from the order of millimeters to centimeters (Shi and Durucan 2005). If CO₂ is injected into coal seams it can displace gas methane enhancing coal bed methane recovery (Sousa 2012a).

Coals can be classified according to their carbon content, whose proportion increases as coalification progresses over time, with impact of pressure and temperature with geophysical and geochemical implications (Rodrigues 2002; Lemos de Sousa et al. 2010; Rodrigues et al. 2013). In ascending percentage of carbon, the main coal types are lignite, bituminous coal and anthracite (or low- medium and high rank coal). The gas storage mechanism in coal seams is distinctively different from that in oil and gas reservoirs and aquifers, where injected CO₂ occupies the pore space as a separate phase or is dissolved in water or oil. Over the last two decades coalbed methane (CBM) has become an important source of (unconventional) natural gas supply in USA. Carbon dioxide enhanced coalbed methane recovery (CO₂-ECBM) is an emerging technology, which has the potential to store large volumes of CO₂ in deep unminable coal formations (coalbeds).

Carbon capture and storage (CCS) is nowadays a very important and potential approach to mitigate climate changes caused by the emission of CO₂ (IPPC 2005; Sousa 2012a; EASAC 2013). In the case of China CCS systems have started to develop mainly in the last decade with the increasing concern over the threat of climate change. Details about CCS activities in China are described in Zhang and Sousa (2012).

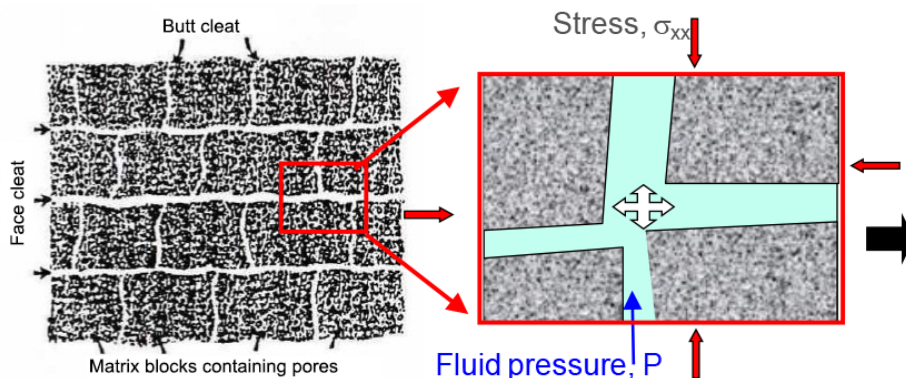


Figure 1 – Microstructure of coal (Qu et al. 2012).

CO₂ can also be stored in abandoned coal mines. Figure 2 gives an idea of the complexity of these reservoirs. An explanation of the problems and constraints associated to these types of reservoirs is addressed to the publication of Piessens (2012).

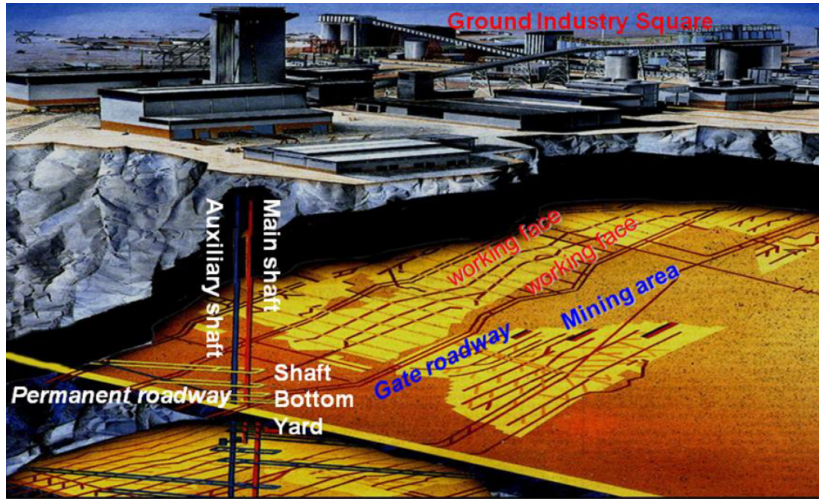


Figure 2 – Coal mine in China (He 2012).

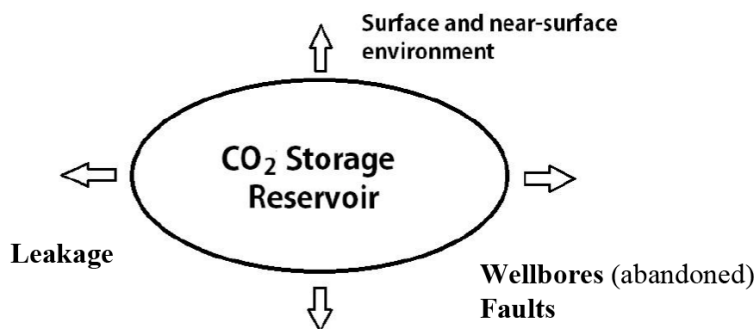
Underground space in coal mines is produced by four approaches, i.e. vertical shaft development, inclined shaft development, adit development and mining excavation development (He 2012). The access to the mines is typically by vertical shafts (Figure 2) that are widely used in China. This approach can be divided into single level and multi-level developments. Inclined shaft development is another option to access. Depending on different approaches, underground mine space is divided into (He 2012): space that includes the shafts, underground chambers and permanent roadways; space including gate roadways of the working face, partly affected by coal mining, and which remains stable after mining; and the space of working face panels, strongly affected by coal mining and collapse of overlying strata. The volume of underground space can be roughly estimated for a medium-sized mine of 2 million tons annual output which has been abandoned after 30-year mining.

In China, the Xuzhou Mining Group was selected to quantify the underground space of abandoned coal mines. The Group has 120 years of coal mining history and is an important coal producer for Jiangsu Province in East China region. By 2008, the Group has closed eight mines, including Dongzhuang, Hanqiao, Mapo, Yian, Qingshanquan, Xinhe, Woniu and Dahuangshan. In these abandoned mines, the shafts were intact, and a total of 46.53 million m³ of underground space can be used for CO₂ storage according to above calculation (Table 1). China currently has more than 2000 medium-large scale coal mines with annual output of 400,000 tons. The number of abandoned coal mines is increasing fast. In our opinion, there is adequate underground space that can be used from abandoned coal mines in China (He 2012).

Table 1 – Estimated underground space of abandoned coal mines of Xuzhou Mining Group (He 2012).

Coal Mine	Depth (m)	Output (kt/a)	Production period	Underground space (10 ³ m ³)
Dongzhuang	100~650	600	1958-2000	7,300
Hanqiao	100~450	500	1950-2007	8,100
Mapo	200~400	200	1972-1999	2,350
Yian	100~700	450	1963-2007	5,950
Qingshanquan	200~1121	300	1950-2000	4,750
Xinhe	300~1100	450	1960-2007	6,280
Woniu	100~300	300	1960-2007	4,500
Dahuangshan	100~600	600	1958-2000	7,300
Total				46,530

Risk assessment is used to ensure the long-term safety of a geologic storage project. Information about the characterization of a site for a geologic CO₂ storage system provides the required input for risk assessment modeling calculations. The evaluation concerns some potential risks, particularly with regards to the possibility that CO₂ can reach the surface and near-surface environment (Figure 3). Consequently, it is important to identify pathways along which CO₂ can move.

**Figure 3** – Geologic CO₂ storage system.

The risks associated with earlier stages of storage in coal formations, with or without methane production, are referred to in several publications (Myer 2003; IPPC 2005; Duguid et al. 2008; Gomes 2010; Sousa and Sousa 2012). Abandoned mines require major rehabilitation work, checking the conditions for sealing wells and shafts. Figure 4 summarizes possible CO₂ leakages. Whereas the causes for geomechanical problems, the risks and their factors are summarized in Sousa and Sousa (2012). Figure 5 presents causes, risks and measures to be taken with regard to CO₂ injection with or without methane production.

In summary, CO₂ geologic storage may impact on (Barros et al. 2012):

- Human health and safety.
- Biodiversity.
- Atmospheric environment (including greenhouse gases emissions).

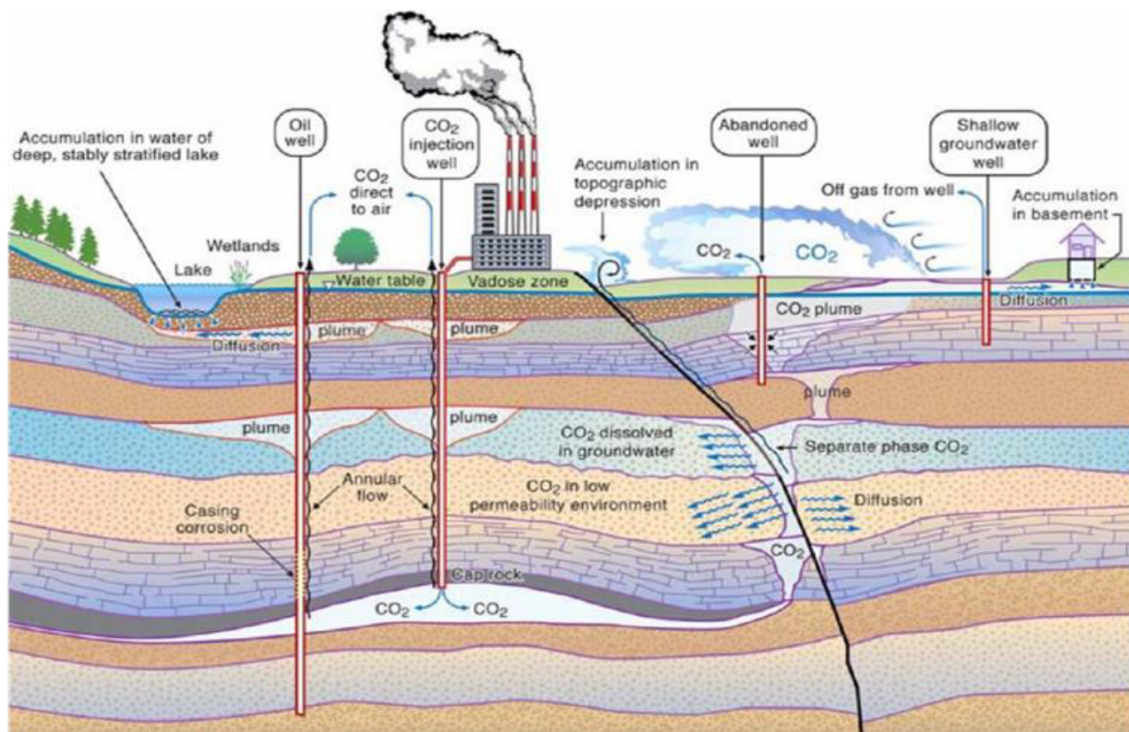


Figure 4 – Potential escape mechanisms (Benson 2005).

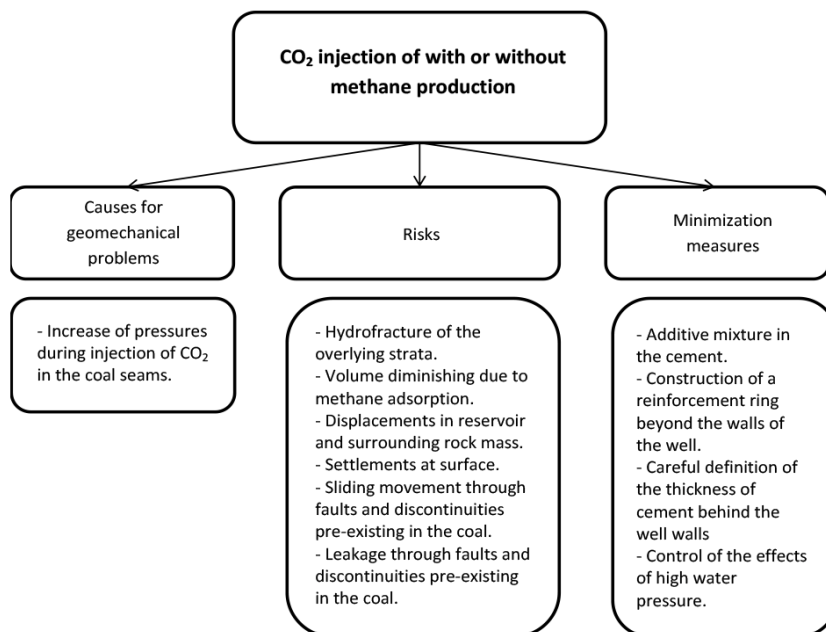


Figure 5 – CO₂ injection with or without methane production: diagrams with causes for geomechanical problems, risks and minimization measures (Adapted from Sousa and Sousa 2012).

- Water (groundwater and surface water).
- Geology (soils and underground space).
- Waste (including construction debris).
- Socio-economic impact on populations.

CCS units have specific risks; the most important are summarized in Table 2. The next section evaluates different risks and the major scenarios for leakage of CO₂ from storage reservoir.

Table 2 – Specific risks associated with storage in CCS units (Adapted from Barros et al. 2012).

Onshore storage risk identification	Probability of occurrence	Direct and indirect consequences	Risk level	Impact level
Overpressure in the reservoir due to CO ₂ injection and storage	Very low	Rise of hydrostatic pressure in the reservoir: displacement of brine (saline aquifers) or other fluids (as CH ₄ , from coal seams). Activation of micro fractures and (or) faults as a result from hydrostatic pressure elevation. Temporary or definite lack of capacity of the reservoir: Impossibility of further CO ₂ injection in the site - Selection of other CCS unit or inactivity (Closure of the CCS unit).	Low (coal) to moderate (Aquifer)	Irrelevant to significant but mitigable
Migration of CO ₂ into geologic formations	Very high	Lateral and (or) descendent diffusion of CO ₂ from the storage complex into neighbour formations (the caprock - top sealing rock layer is, by definition, impermeable to CO ₂). CO ₂ reactive processes with minerals of neighbour geologic formations (secondary trap mechanisms occurring at long-term storage).	Very Low	Irrelevant
Migration of CO ₂ into aquifers or aquitards	Very low	Dissolution of CO ₂ into the water, possible pH decrease and water acidification. Reaction of CO ₂ with other water dissolved substances. Potable water contamination with impurities (from the CO ₂ stream such as H ₂ S).	Very High	Significant not mitigable
Leakage of CO ₂ into atmosphere from storage complex through:	1 Unlikely (containment criteria for site selection)	Possibility of CO ₂ entry into the caprock due to integrity failure (caused by unexpected geologic events such as an earthquake). Possibility of CO ₂ to find a way through the overburden to the subsurface, ground waters or even the atmosphere.	Acute	Significant not mitigable
1. Caprock	2 and 3 (continuous monitoring of wells during operation and past-closure phases)	Flow of fluids along the well (CO ₂ and possibly also brine) caused by: • failure of well integrity or improper sealing of an injection well • degradation of well cement, casing or plugging after long-term storage period • Eventual penetration of CO ₂ leaking flow into the subsurface, ground waters or even atmosphere.	Moderate to Very High	Significant but mitigable
2. Injection wellbores				
3. Abandoned wellbores				
Soil and ground water disruption after long-term storage	Not yet determined	Possibility of ground movement and fracture through induced micro seismicity and stress. Possibility of groundwater circulation disturbance caused by fracturing activation or expansion. Possibility of uplift or subsidence of layers caused by overpressure of the reservoir	Acute	Unknown

3. RISK EVALUATION

3.1. General

Risk assessment is developed with the purpose of avoiding the major problems that can occur in CCS systems. There are already several storage operations in depleted gas and oil reservoirs, and in saline aquifers with related EOR and EGR technology. Therefore, it is necessary to implement a process of risk assessment at all stages of a given project.

There are many definitions for risk (Einstein 2002), and in this chapter we follow the definition

by Sousa and Sousa (2012). Thus, for different failure modes E_j with different consequences and vulnerability levels, the expected risk can be defined as follows (Sousa 2010):

$$E[R] = \sum_j \sum_i P[E_j] \times P[u(C_j) : E_j] \times u(C_i) \quad (1)$$

where:

R – the Risk.

$P[E_j]$ – the probability of the event E_j .

$P[u(C_j) | E_j]$ – the vulnerability to the failure mode j .

$u(C_i)$ – the utility of consequence i .

Risk assessment and risk management for CCS systems requires an evaluation of what hazard is possible and the likelihood of the harmful effects. Risk assessment starts with the hazard identification followed by detailed assessment of each hazard. Based on studies presented in several publications (Myer 2003; IPCC 2005; Price et al. 2008; Sousa and Sousa 2012), several hazard identification scenarios were characterized. For CO₂ geological storage in coal eight scenarios were defined as represented in Table 3.

Table 3 – Hazard identification scenarios for CO₂ storage in coal.

Hazard	Description
R ₁	Escape of CO ₂ from pumping wells or injection of fluids
R ₂	Slow and steady leakage of CO ₂ from geological storage
R ₃	Fast and large discharge of CO ₂ from geological storage
R ₄	Leakage from geological storage to groundwater
R ₅	Leakage of CO ₂ from geological storage to fossil fuel assets
R ₆	Leakage of CO ₂ that eliminates the benefits of geological storage
R ₇	Induced fracturing or seismicity
R ₈	Leakage from abandoned coal mines

3.2. Different hazard scenarios

With regard to CO₂ storage the main risks are as follows: (i) the safety of the selected sites in what concerns risk of leakage, (ii) the effects induced by the increase of pressure caused by the CO₂ injection, (iii) the eventual induced seismicity, and (iv) the long-range impact (EASAC 2013).

The existence of pumping wells or injection of fluids is a major source of potential escape problems of CO₂. The wells make the connection between surface and the reservoirs and consequently crossing all rock strata creating an eventual path to the leakage of CO₂ due to imperfections. The sealing caprock, the walls of the well and the annular interface with walls, the first layer of cement case and the rock mass surrounding are important elements to be studied (Celia et al. 2006; Sousa and Sousa 2012). This situation corresponds to first scenario R₁ represented at Table 3. Figure 6 shows potential escape paths of CO₂ along wells.

Leakage of CO₂ from the reservoir may be slow and steady (hazard R₂) or fast with large

discharge of CO_2 (hazard R_3). For hazard R_2 the releases are too small to cause significant death or injury but can cause local problems. However, for hazard R_3 , a significant amount of CO_2 can originate in large scale fatalities. Large scale fatalities are rare, but they have already occurred namely in volcanic areas, such as it occurred at Lake Nyos in Cameroon. The risk of such event is low. However, actions can be taken to reduce the chance of such events. The proximity of the geological reservoirs of lakes and of faults should be avoided (Price et al. 2008). Selected reservoirs are chosen far from locations with high concentration of populations. If the reservoir is located near a large and deep lake, monitoring of CO_2 concentration should be performed.

Scenario R_4 considers the migration of CO_2 from the reservoir to the surface, potentially affecting shallow groundwater used as potable water, or for industrial and agricultural needs. Dissolved CO_2 forms carbonic acid, and potentially causes indirect effects, including mobilization of (toxic) metals or sulphate; and possibly giving the water an odd odor, color or taste. In the worst case, contamination might reach dangerous levels, excluding the use of groundwater for drinking or irrigation (IPCC 2005). It is relevant to develop appropriate inspection methodologies coupled with the use of dynamic BN for risk analysis, as presented in Sousa and Sousa (2012).

Hazard R_5 corresponds to the leakage to fossil fuel assets. The injection of CO_2 at high pressures can lead to seepage into fossil deposits through faults and other relevant discontinuities. The major risk is associated with the contamination of the reservoir and consequently induces a severe economic risk. Recommended actions to reduce risks can be to select sites far from fossil fuel assets and (or) that are likely to retain their CO_2 for a long period.

Situation R_6 corresponds to the leakage of CO_2 to the atmosphere that eliminates the benefits of geological storage and only includes an increase of costs. Consequently, it is necessary to perform remedial actions, through monitoring, to ensure that wells are well sealed.

Scenario R_7 corresponds to induced fracturing or seismicity. Such events are in general very small, causing no damage. According to EASAC (2013), induced seismicity has not been experienced but research on the potential for induced seismicity is underway. Actions suggested

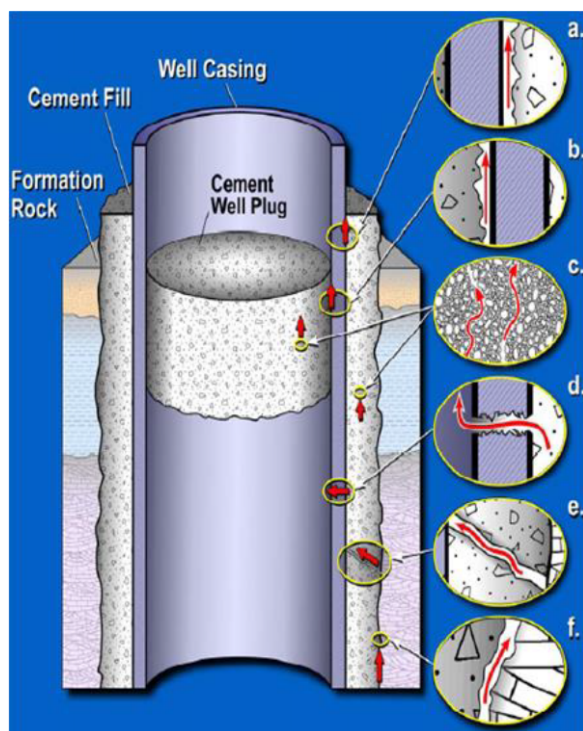


Figure 6 – Potential escape pathways along wells (Celia et al. 2006).

to reduce risks from induced fracturing are referred to in Price et al. (2008).

Finally, hazard R_g is associated to leakage from abandoned coal mines which is a possibility mainly in China due to many already abandoned coal mines as presented in section 2. In coal mines, slow high concentrations can be reached by a sudden release of CO_2 . CO_2 is denser than air and high concentrations can happen in confined areas near the surface and cause risks to humans, much as occurred in volcanic lakes. The effect of active faults is an important issue to be considered (Sousa and Sousa 2012). An abandoned coal mine when used as a reservoir can be seen as a very long gallery conceptual model (Figure 7). The so-called jar pot model, as represented in Figure 8, provides a good image of the constraints and it is an important tool to understand the pressure evolution in the mine once injection has stopped (Piessens 2012).

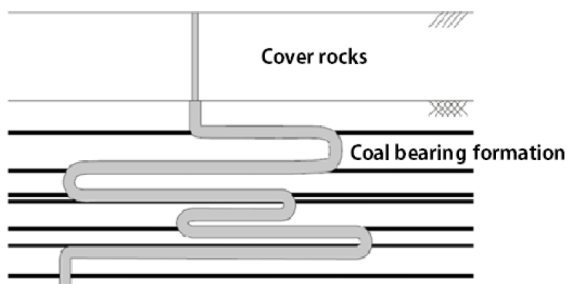


Figure 7 – Simplified representation of an abandoned coal mine (Piessens and Dusaar 2003).



Figure 8 – The different elements of the jar pot model, with partially flooded residual space corresponding to the jar (Piessens 2012).

3.3. Modelling and monitoring

Storage of large volumes of CO_2 in carboniferous reservoirs implies large-scale pressures that may cause fractures in the cap-rock and may drive CO_2 or brine leakage through localized pathways. Therefore, predictions are required and a detailed analysis of the behavior of reservoirs is necessary (Vargas et al. 2012; EASAC 2013). Analytical tools should be able to simulate the short and long processes for CO_2 reservoirs in a similar way as those for oil and gas reservoirs. Numerical models are of common use for predicting the behavior of these reservoirs. Risk analyses may be carried out at the wellbore scale and at the reservoir scale, and should be performed simulating different scenarios with parametric and sensitivity analyses, and using numerical commercial codes or in-house developed codes.

It is fundamental to identify and to describe the involved processes that comprise physical, chemical and biological processes and their coupling (Elsworth et al. 2012). A detailed analysis of these problems is presented by Vargas et al. (2012), as well as the formulations for the numerical modelling of continuum and of pore scale.

An example presented by Vargas et al. (2012) is related to the injection of a non-wetting fluid into a fissured geometry representative of a coal micro-structure considering Lattice-Boltzmann

methods. Figure 9 shows the geometry used in the analysis of the injection process of CO_2 . The considered geometry is representative of cleats in coal seams. The diffusion of CO_2 is not considered but these processes can also be modelled.

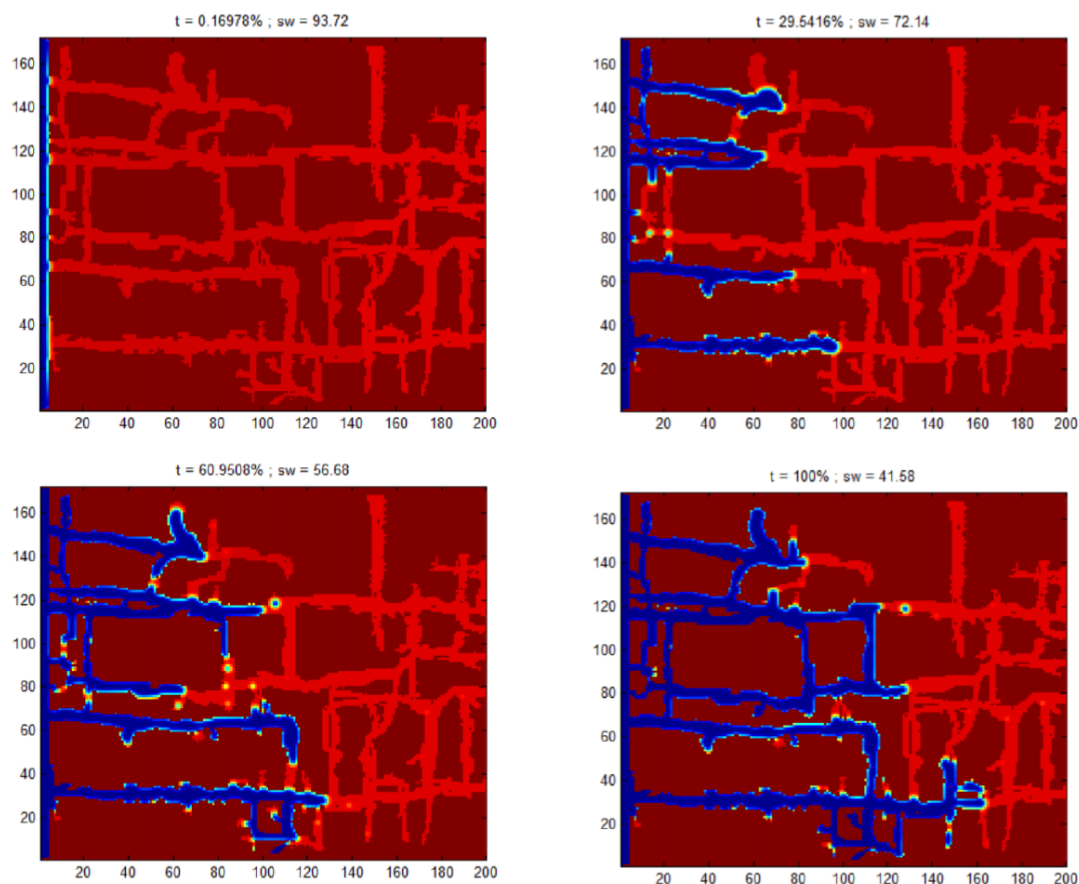


Figure 9 – Injection process of CO_2 in coal formation cleats (Vargas et al. 2012).

Also, the development of techniques and strategies is necessary for a better characterization before injecting the CO_2 . Preventing risks monitoring is needed and a plan should be established and the conceptual and numerical models validated (IPCC 2005; EASAC 2013).

Measurements of certain parameters should be made to assess the behavior of the CO_2 reservoir system. The results of the monitoring must be compared with ones predicted by modeling. The models can be updated after careful interpretation of a set of observed results.

Monitoring is performed for various purposes, such as (IPCC 2005):

- to ensure and to document the volume injected into wells, specifically to monitor the conditions of the injection well and measuring the rates of injection, as well as the pressures on the top of the well and in the formation;

- to verify the amount of injected CO₂ that was stored by different mechanisms;
- to optimize the efficiency of the storage project, through the knowledge of the volume storage, the most appropriate injection pressures and the need for drilling new wells;
- to demonstrate, with appropriate monitoring techniques, that CO₂ is still contained in the intended storage formations;
- to detect leaks and to provide an early warning of any occurrence, so that the situation can be remedied by appropriate mitigation measures;
- to know the integrity of wells that are being used or are abandoned;
- to calibrate and verify models for determining the performance;
- to detect micro-seismicity associated to storage projects.

Details of the methodologies followed in monitoring are described in IPCC (2005). The actual state of technology is sufficient to meet the needs of monitoring. Table 4 summarizes some techniques and how each can be applied to CCS projects.

Table 4 – Summary of direct and indirect techniques that can be used to monitor CO₂ storage projects (Adapted from IPCC 2005).

Measurement technique	Measurement parameters	Measurement technique	Measurement parameters
Introduced and natural tracers	- Travel time - Partitioning of CO ₂ into brine or oil - Identification of sources of CO ₂	- Passive seismic monitoring	- Location, magnitude and source characteristics of seismic events
Water composition	- CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ - Major ions - Trace elements - Salinity	- Electrical and electromagnetic techniques	- Formation conductivity - Electromagnetic induction
Subsurface pressure	- Formation pressure - Annulus pressure - Groundwater aquifer pressure	- Time-lapse gravity measurements	- Density changes caused by fluid displacements
Well logs	- Brine salinity - Sonic velocity - CO ₂ saturation	- Land surface deformation	- Tilt - Vertical and horizontal displacements using interferometry and GPS
Time-lapse 3D seismic imaging	- P and S wave velocity - Reflection horizons - Seismic amplitude attenuation	- Visible and infrared imaging from satellite or planes	- Hyperspectral imaging of land surface
Vertical seismic profiling and crosswell seismic imaging	- P and S wave velocity - Reflection horizons - Seismic amplitude attenuation	- CO ₂ land surface flux monitoring using flux chambers or eddy covariance	- CO ₂ fluxes between the land surface and atmosphere
Soil gas sampling	- Soil gas composition - Isotopic analysis of CO ₂	- Detect elevated levels of CO ₂ - Identify source of elevated soil gas CO ₂ - Evaluate ecosystems impacts	

4. METHODOLOGIES FOR RISK ANALYSIS

4.1. Introduction

There are several methodologies available for data analysis and representation, including event trees, rule-based systems, fuzzy-rule based systems, artificial neural networks, and BN for risk analysis (Sousa 2012b). Knowledge representation systems (or knowledge-based systems) and decision analysis techniques were both developed to facilitate and improve the decision-making process. Knowledge representation systems use various computational techniques of AI (Artificial Intelligence) for representation of human knowledge and inference. Decision analysis uses decision theory principles supplemented by judgment psychology (Henrion et al. 1991). Both emerged from research done in the 1940's regarding development of techniques for problem solving and decision making.

Although the two fields have common roots, since then they have taken different paths. More recently there has been a resurgence of interest by many AI researchers in the application of probability theory, decision theory and analysis to several problems in AI, resulting in the development of BN and influence diagrams, an extension of BN designed to include decision variables and utilities. A description of the main methodologies is presented in following (Sousa 2012b). However, BN has several advantages over other methods, reason why in section 4.6 their fundamentals are described in detail.

4.2. Ruled-Based Systems

Ruled-Based Systems are computer models of experts in a certain domain. The building blocks for modeling the experts are called production rules (Sousa 2012b). A production rule is of the form: *If A then B*, where A (premise) is an assertion, and B (conclusion) can be either an action or another assertion. A ruled-based system consists of a library of such rules. These rules reflect essential relationships within the domain, or they reflect ways to reason about the domain. When specific information about the domain comes in, the rules are used to draw conclusions and to point out appropriate actions.

A ruled-based system (or expert system) consists of a knowledge base and an inference engine. The knowledge base is the set of production rules, and the inference engine combines rules and observations to come up with conclusions on the state of the world and on what actions to take. One of the major problems of ruled-based systems is how to treat uncertainty. There are many schemes for treating uncertainty in ruled-based systems. The most common are fuzzy logic (see section 4.3), certainty factors and Dempster - Shafer belief functions (Dempster 1968; Russell and Norvig 2003). However, it is not easy to capture reasoning under uncertainty with inference rules for production rules. The reason for this is that in all the schemes for treating uncertainty, mentioned above, the uncertainty is treated locally. More specifically, it is difficult to combine (un)

certainties from different rules. Despite their shortcomings, Rule Based Systems have been used in many applications in different domains, such as Medicine, Banking, Aerospace Engineering for scheduling operations for the recycling Space Shuttle flights and for Civil Engineering in the recommendation system MATUF in the maintenance and repairing of tunnels (Sousa et al. 2009) and in a recommendation system for repairing bridges (Sousa 2000), among others. More recently, these types of systems have been replaced by other techniques that allow one to better and more efficiently incorporate uncertainty.

4.3. Fuzzy-rule Approach

As mentioned previously there are many schemes for treating uncertainty in rule-based systems. Fuzzy logic is one way of introducing uncertainty into rule-based systems. It is a superset of conventional logic that has been extended to handle the concept of “partial truth”, i.e. a value between (completely) true and (completely) false (Zadeh 1999). Based on fuzzy logic, fuzzy rule expert systems were created. They use a collection of fuzzy membership functions and rules drawn out from the experts. The rules to evaluate the fuzzy “truth” T of a sentence are presented in equations (2):

$$\begin{aligned} T(A \sqcap B) &= \min(T(A), T(B)) \\ T(A \sqcup B) &= \max(T(A), T(B)) \\ T(\neg A) &= 1 - T(A) \end{aligned} \quad (2)$$

where T is the fuzzy “truth” and A and B are variables or complex sentences. The AND ($\sqcap$), OR ($\sqcup$), and NOT ($\neg$) operators of Boolean logic exist in fuzzy logic; usually define the minimum, maximum, and complement. For example, if A represents Low Pressure of the value p^* then $T(A) = \mu_p$. Imagine that B represents High Temperature, of the value t^* and $T(B) = \mu_t$. The result of Low Pressure (p^*) and High Temperature (t^*), i.e. $T(A \sqcap B)$ would be the $\min(T(A), T(B)) = \min(\mu_p, \mu_t)$.

The inference mechanisms of these rules have some weaknesses; they have a weak theoretical foundation, inconsistency and sometimes oversimplification of the real world. Despite their shortcomings, fuzzy logic has been applied to several domains. In geotechnical engineering an application of fuzzy logic is in the use of Fuzzy set rules in rock mass characterization (Sonmez et al. 2003; Sousa 2012b).

4.4. Artificial Neural Networks

An artificial neural network (ANN) is an interconnected group of artificial neurons (Figure 10), similar to the network of neurons in the human brain, that uses a mathematical model or computational model for information processing based on a connectionist approach to computation (Russell and Norvig 2003; Suwansawat and Einstein 2006; Miranda 2007).

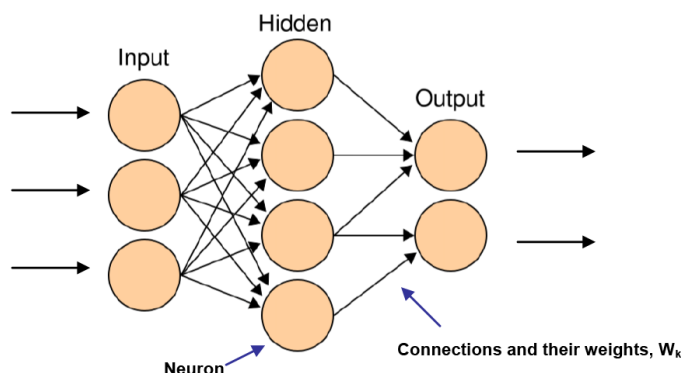


Figure 10 – Neural network with one hidden layer (Sousa 2012b).

by adjusting these weights and the connections between neurons. Figure 10 shows an example of a neural network with one hidden layer.

The ANN relies on data to be trained, adjusting their weights and connections to optimize their behavior as pattern recognizers, decision makers, system controllers, predictors, etc.

The strength of these models is their adaptiveness, without requiring a deep knowledge about the complex relationships of the domain of application. This adaptiveness allows the system to perform well even when the system that is being modeled, or controlled, changes over time.

The objective of using an ANN is to make predictions in the future. Although, an ANN network could provide almost perfect answers to the set of data with which it was trained, it may fail to produce an adequate answer when “new” data surfaces. This is a result of “overfitting” (Suwansawat and Einstein 2006). To perform adequately and produce good results, these systems require a large number of sample data in order to be trained. Also, since there is not a complete understanding of the learning process, the analysis of the results may be difficult. Thus, this is not the right approach in cases in which one needs to have a complete understanding of the problem domain and relationship among variables of the domain.

4.5. Classical Decision Analysis

Decision analysis is a logical procedure for the balancing of the factors that influence a decision. The procedure incorporates uncertainty, values, and preferences in a structure that models decision (Howard and Matheson 1984). A classical tool used to model decisions and incorporate in a formal manner the relevant components of decision analysis is the decision tree. Prior to decision analysis, fault trees and event trees can be used to model on one hand the different ways an event can occur (fault tree) and on the other hand, systematically identify the possible sequence of events and their consequences (event tree).

Fault tree analysis is a technique used to analyze an undesirable event and the different ways

An ANN consists of multiple layers of single processing elements called neurons and of their connections. Each neuron is linked to some of its neighbors with a varying coefficient of connectivity (weight) that represents the strength of these connections. This is stored as a weight value on each connection.

The ANN learns new knowledge

that the undesirable event can be caused. A typical fault tree is composed of several different symbols (Eskesen et al. 2004).

An event tree is a representation of the logical order of events leading to consequences. In contrast to the fault tree it starts from a basic initiating event and develops from there in time until all possible states with consequences (adverse or not). A typical representation of an event tree is shown in Figure 11. This is an example regarding the non-destructive testing of a reinforced concrete structure for corrosion. The inspection may or not detect the corrosion. The event CI denotes that corrosion is present, and the event I that the corrosion is found by the inspection. The bars over the events represent the complementary events. Based on this tree, one can evaluate the probability that corrosion is in fact present given that the inspection says so.

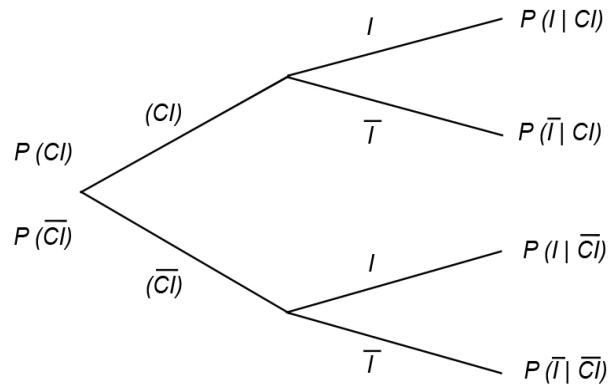


Figure 11 – Typical event tree (Faber 2005).

Event trees can become very complex to analyze rather quickly. For a tree with n two-state components the total number of paths is 2^n . If each component has m states, the total number of branches is m^n .

Fault trees and event trees (or decision trees) can be combined. The combined fault tree and event tree is illustrated in Figure 12, which shows how fault trees can model an initiating event for the event tree. Note that the same fault tree can be combined with a decision where one can assess whether or not it would be worth taking measures to avoid or mitigate damage.

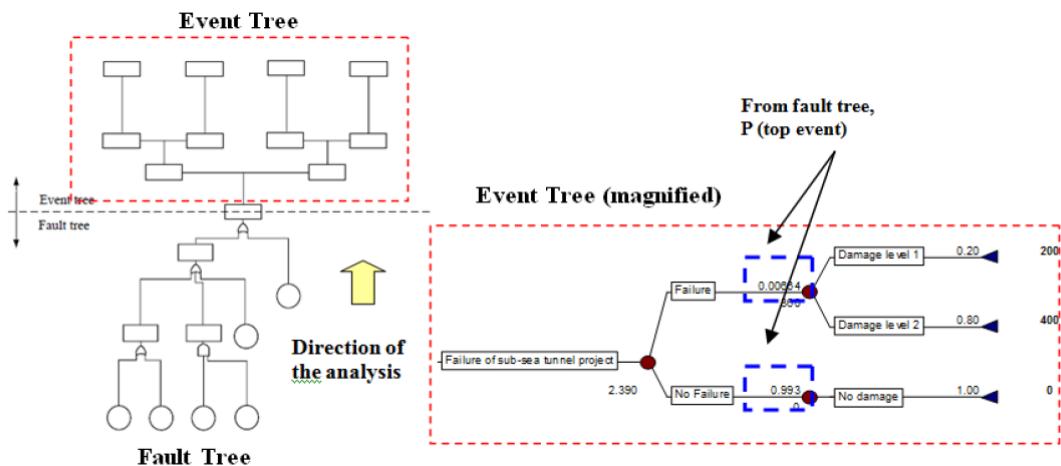


Figure 12 – Combination of a fault tree and an event tree (Sousa 2012b).

A decision tree is a formal representation of the various components of a decision problem. It consists of a sequence of decisions, namely a list of possible alternatives; the possible outcomes associated with each alternative; the corresponding probability assignments; monetary consequences and utilities (Ang and Tang 1975). The typical configuration of a simple decision tree is shown in Figure 13.

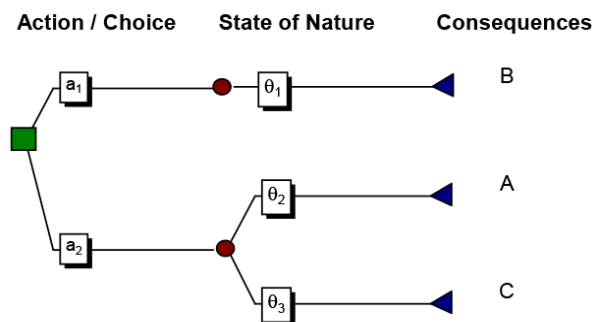


Figure 13 – Typical decision tree (Faber 2005).

There are three types of nodes in a decision tree. The decision nodes, which are squared, represent different decisions or actions. The chance nodes, which are circular, are nodes that identify an event in a decision tree where a degree of uncertainty exists. The utility nodes, which are triangular, are nodes that terminate a branch path and represent the utilities associated with the path.

Figure 13 models a case where the decision maker is faced with two decisions/actions, a_1 and a_2 . The consequence of action a_1 is with certainty B. However, the consequence of decision a_2 depends on the state of nature. Before the true state of nature is known the optimal decision depends upon the likelihood of the various states of nature θ_i and of the consequences A, B and C.

The valuation of an outcome, or the utility of an outcome, translates the relative preference of the decision maker towards different outcomes. The utilities are commonly based on monetary values, but they can also be based on other dimensions such as time or environmental effects. Multi-attribute theory provides a way to combine all different measures of preference to come out with one single scalar utility to represent the relative preference of any outcome.

4.6. Bayesian networks (BN)

A BN, also known as belief network, is a graphical representation of knowledge for reasoning under uncertainty. Over the last decade, BN become a popular model for encoding uncertain expert knowledge in expert systems (Heckerman et al. 1997). BN can be used at any stage of a risk analysis, and may substitute both fault trees and event trees in logical tree analysis. While common cause or more general dependency phenomena pose significant complications in classical fault tree analysis, this is not the case with BN. They are in fact designed to facilitate the modeling of such dependencies. Because of what has been stated, BN provide a good tool for decision analysis, including prior analysis, posterior analysis and pre-posterior analysis. Furthermore, they can be extended to influence diagrams, including decision and utility nodes in order to explicitly model a decision problem.

The concepts of Bayes' theorem are essential for BN. For the basic concepts of probability theory (such as event, random variable, probability functions, among others) it is necessary to understand the methodology of BN (Ang and Tang 1975).

A BN is a concise graphical representation of the joint probability of the domain that is being represented by the random variables, consisting of (Russell and Norvig, 1993):

- A set of random variables that make up the nodes of the network.
- A set of directed links between nodes. (These links reflect cause-effect relations within the domain).
- Each variable has a finite set of mutually exclusive states.
- The variables together with the directed links form a directed acyclic graph (DAG).
- Attached to each random variable A with parents $B_1, \dots, B_n$ there is a conditional probability table, $P(A = a \mid B_1 = b_1, \dots, B_n = b_n)$ except for the variables in the root nodes.

The root nodes have prior probabilities.

Figure 14 is an illustration of a simple BN. The arrows going from one variable to another reflect the relations between variables. In this example the arrow from C to B_2 means that C has a direct influence on B_2 .

A BN is a joint probability distribution of all the variables, taking into account that some variables are conditionally independent. The simplest conditional independence relationship encoded in BN is that a node is independent of any ancestor nodes given to its parents, i.e. that a node only depends on its direct parents. Thus, the joint probability of a BN over the variables $U = \{A_1, \dots, A_n\}$, can be represented by the chain rule:

$$P(U) = \prod_i^n P(A_i = a_i \mid \text{parents}(A_i)) \quad (3)$$

where "parents (A_i)" is the parent set of A_i .

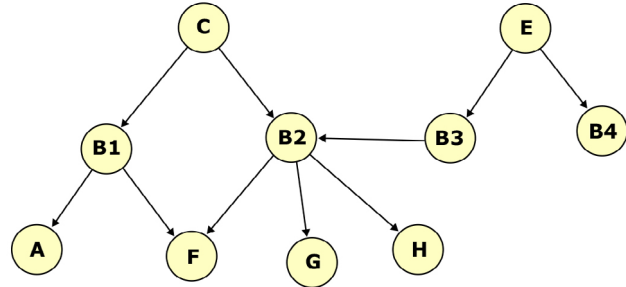


Figure 14 – BN example.

The difference between the general chain rule and chain rule applied to BN is that in BNs a variable is conditionally independent of their non-descendants, given the values of their parent variables, e.g. in the network of the variable A is conditionally independent of C given B_1 . It is this property that makes BN a very powerful tool for representing domains under uncertainty.

Since a BN defines a model for variables in a domain and their relationships, it can be used to answer probabilistic queries about them. This is called inference.

The most common types of queries are the following:

A priori probability distribution of a variable.

$$P(A = a) = \prod_{X_1}^K \prod_{X_k} P(x_1, K, x_k, A = a) \quad (4)$$

where A is the query-variable and X_1 to X_k are the remaining variables of the network. This type of query can be used during the design phase of a tunnel for example to assess its probability of failure for the design conditions (geology, hydrology, etc.).

Posterior distribution of variables given evidence (observations). This query consists of updating the state of a variable (or subset of variables) given the observations (new information).

$$P(A = a | e) = \frac{P(A = a, e)}{\prod_{X_1} \dots \prod_{X_k} \prod_A P(x_1, K, x_k, A = a, e)} \quad (5)$$

where e is the vector of all the evidence, and A is the query variable and X_1 to X_k are the remaining variables of the network. This type of query is used to update the knowledge of the state of a variable (or variables) when other variables (the evidence variables) are observed. It could be used, for example, to update the probability of failure of a tunnel, after construction has started and new information regarding the geology crossed becomes known (Sousa and Einstein 2012).

The most straightforward way to make inference in a BN, if efficiency were not an issue, would be to use the equations above to compute the probability of every combination of values and then marginalize out the ones one needed to get a result. This is the simplest but the least efficient way to do inference. There are several algorithms for efficient inference in BN, and they can be grouped as follows: exact inference methods and approximate inference methods. The most common exact inference method is the Variable Elimination algorithm that consists of eliminating (by integration or summation) the non-query, non-observed variables one by one by summing over their product. This approach takes into account and exploits the independence relationships between variables of the network.

Approximate inference algorithms are used when exact inference may be computationally expensive, such as in temporal models, where the structure of the network is very repetitive, or in highly connected networks.

There are several types of BN:

i) *Discrete BN*:

- Each node is an event described by a random variable that may have several states.
- All nodes coupled with parent ones are defined by a table of conditional probabilities or by a function of conditional probabilities.
- For the nodes without parents, the probabilities of states are unconditional.

ii) Continuous BN:

In many cases, events may take any states from some range, i.e., X is a continuous random variable whose space of possible states is the full range of its admissible values, containing an infinite point set. Here, we cannot speak about the probability of an isolated state, since, for their infinitely large number, the weight of each of them will be equal to zero. Therefore, the probability distribution of a continuous random variable is determined differently from the discrete case, and probability distribution functions and probability distribution densities are used for their description.

Continuous BNs are used to simulate stochastic processes in the state space with continuous time.

iii) Hybrid BN:

A hybrid BN combines discrete random variables with continuous random variables. However, there are some restrictions for the use of such BNs:

- Discrete variables cannot have continuous parents.
- Continuous variables should have a normal law of distribution based on conditional probabilities.
- Continuous variable X with discrete parents Y and continuous parents Z is normally distributed.

iv) Dynamic Bayesian Networks (DBN):

A DBN combines in general two Bayesian models, one for risk assessment and other for decision making. An application of a DBN was presented in Sousa and Sousa (2012) for the hazard R_4 (Leakage from geological storage to groundwater) and also was applied with success to the Porto Metro where three collapses occurred during construction (Sousa 2010; Sousa and Einstein 2012).

5. APPLICATIONS OF BN FOR CO₂ RISK ANALYSIS

5.1. General

In this section examples of BN and DBN are presented to illustrate their potential use for risk analysis in CO₂ injection processes and for a wellbore integrity methodology.

The first example was developed for a situation where one wants to determine whether or not is beneficial to inject CO₂ in carboniferous formations at a certain location. In the example presented on Section 5.2, CO₂ risk assessment is based on hazards R_3 and R_4 defined previously in Table 5. The decision maker is looking at different mitigation measures (for reducing the leakage of CO₂), assessing the risk of each option and choosing the one that minimizes it.

Table 5 – Different hypothesis considered in the BN.

Hypothesis	Sedimentary strata	Coal Seams	Wells	Corrosion	Existence of faults
A	Good	Good	Good	-	-
B	Good	Bad	-	Level 2	-

Finally in Section 5.3 an example of a DBN is presented to illustrate the use of BNs coupled with results of a monitoring system for a wellbore integrity problem.

This first example was published in the book *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines* (He et al. 2012) published by CRC Press and also in the article published in the *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (He et al. 2011). The second example was presented at the Euro-Asia Regional Energy Round Table (Sousa and Sousa 2013).

5.2. Risk analysis for storage of CO₂

For the risk analysis due to CO₂ injection in carboniferous formations a BN was develop as presented in Figure 15. The variables involved are associated to:

- Sedimentary strata conditions over the carboniferous formations. 3 values were adopted for the formations: *Good*, *Bad* and *Very Bad*.
- Coal seams characteristics. 3 distinct values were taken: *Good*, *Bad* and *Very Bad*.
- Combined characteristics due to the association of sedimentary strata and coal seams. The values were attributed in function of the properties defined to both formations.
- Geomechanical characteristics of the wells. Two values were adopted for the wells: *Good State* and *Bad State* in function of the existing corrosion.
- Corrosion of the well. Two levels were considered: *Level 1* (reasonable) and *Level 2* (bad).
- Existence of faults. Two hypotheses were considered: *Yes* and *No*.
- Escape of CO₂. For this situation the value to be considered results of the combined characteristics of both formations involved (coal seams and sedimentary strata), of the existence of wells and faults, and of course if CO₂ is injected or not.
- Injection of CO₂. For this situation two distinct values (*Yes* or *No*) were considered.
- Utilities (Consequences). For the utilities the calculated result permits to conclude if the rehabilitation measures should be adopted or not.
- The calculated risk depends of the existence or not of CO₂ escape and of the existence of faults. The following three values were adopted: *High*, *Average* and *Low*.

The local and conditional probabilities associated to each variable of the BN are presented at Sousa and Sousa (2012).

Applications were performed through the software Genie (<http://genie.sis.pitt.edu/downloads.html>). Two hypotheses (A and B) were considered as assigned in Table 5.

For hypothesis A, Figure 16 shows the resulting diagram with probabilities calculations. The results demonstrate clearly that is beneficial to inject CO_2 in the coal seams. For the hypothesis B, Figure 17 shows that resulting BN diagram recommended not inject CO_2 in the coal seams.

Another BN is presented in Figure 18 when active faults were considered. The consequences in this situation can imply the existence of induced earthquakes.

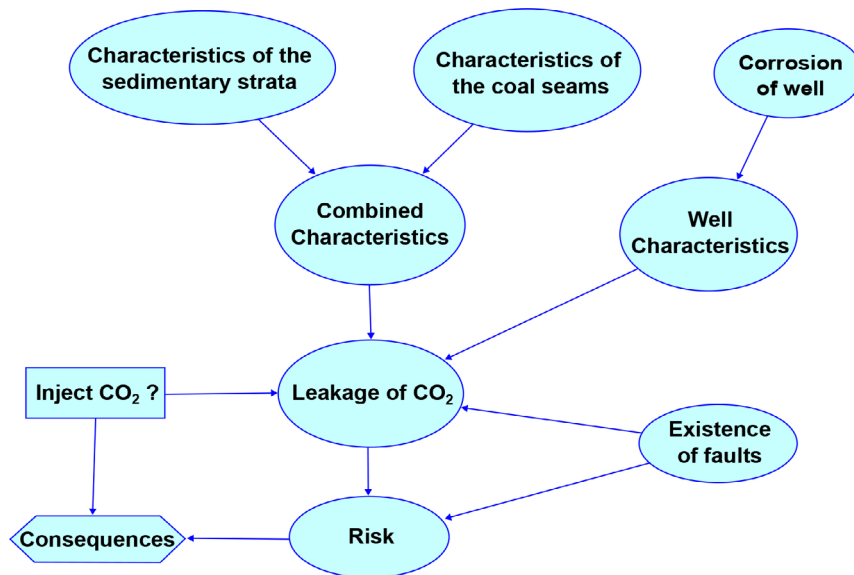


Figure 15 – BN for risk analysis of storage of CO_2 .

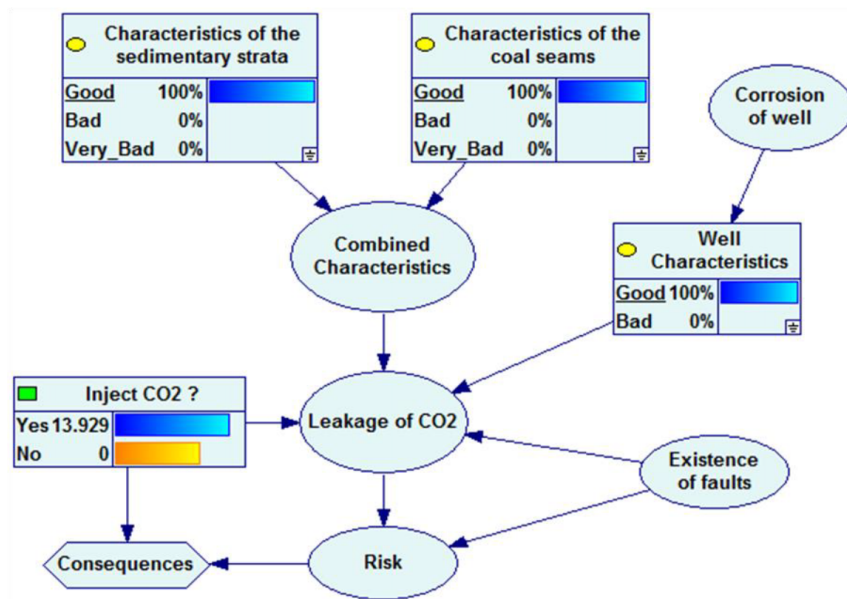


Figure 16 – Diagram for hypothesis A.

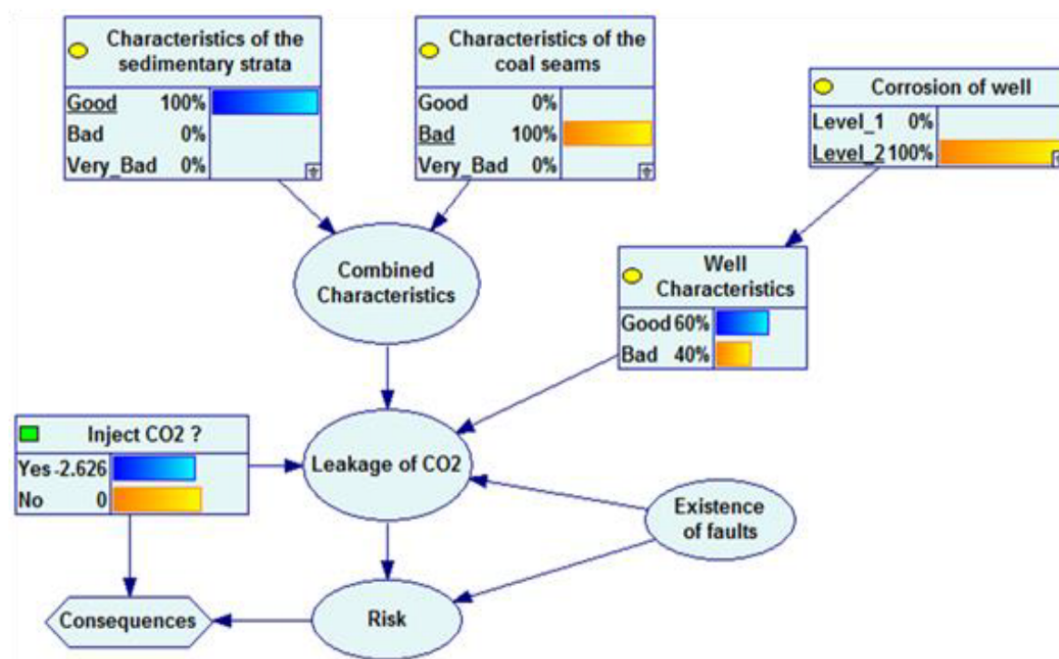
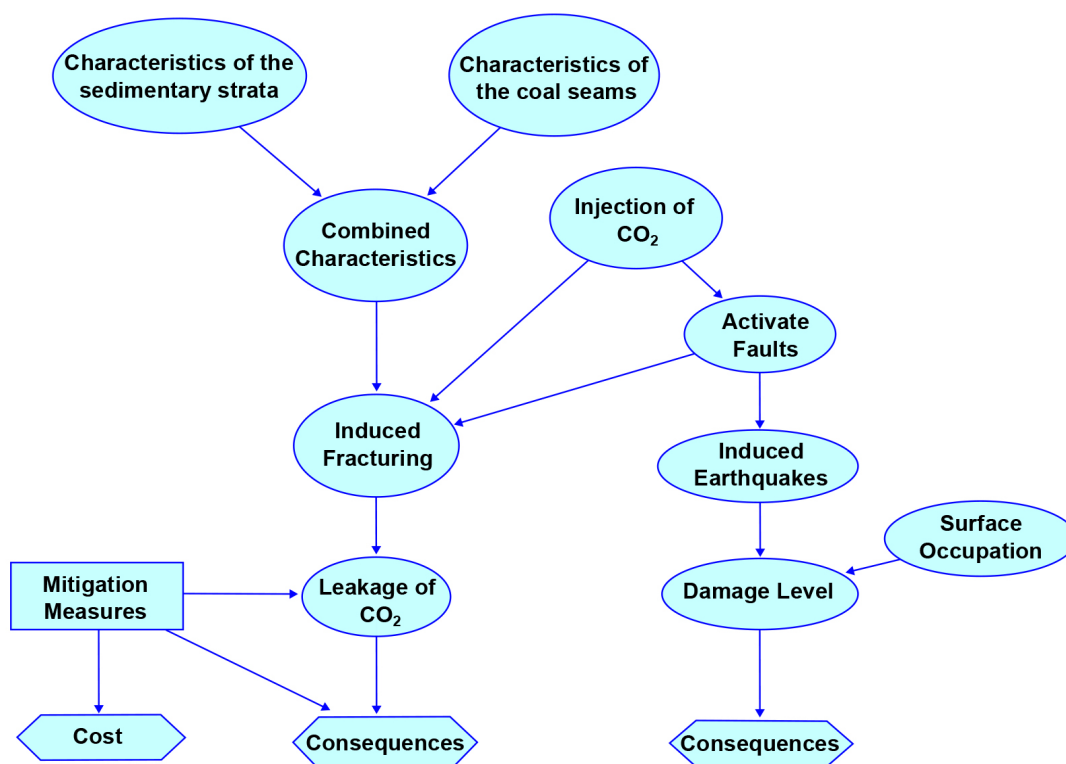


Figure 17 – Diagram for hypothesis B.

Figure 18 – BN for Risk Analysis of storage of CO₂ with the existence of active faults.

5.3. Wellbore integrity methodology based on DBN

The existence of pumping wells or injection of fluids is a major source of potential escape problems of CO₂. This situation corresponds to the hazard R₁ as illustrated in Table 3.

To prevent this situation a wellbore integrity methodology was established using DBN (Sousa and Sousa 2013). In the schematic example presented in this section the wellbore integrity problem is modelled with time coupled with monitoring of the wellbore. Figure 19 illustrates in a simplified way the potential escape pathways along wellbores.

Two models can be built. One for the modeling the integrity of the wellbore that takes into accounts the monitored measurements (Figure 20). The variables O represent the observations or results of tests performed in the well (integrity tests) that will allow one to infer about the wellbore integrity. The other model, the Bayesian decision model, is

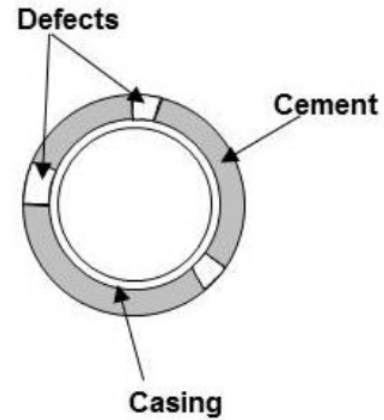


Figure 19 – Interactions between steel casing, cement with defects and the formation.

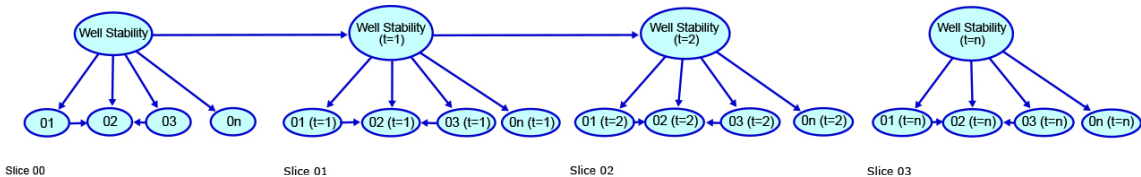


Figure 20 – Modeling the integrity of a wellbore.

indicated in Figure 21. The decision will be made on the optimal remedial solution for an eventual problem that passes through a decision about mitigation measures of the wellbore.

The way the integrity methodology works is as follows (Figure 22):

- i) Monitoring and observation is made at time slice00 and entered in the network.
- ii) The evidence is propagated through the network and the probability of occurrence of an integrity problem is determined.
- iii) The evidence is propagated through into the future and the probability is evaluated for the next slices.

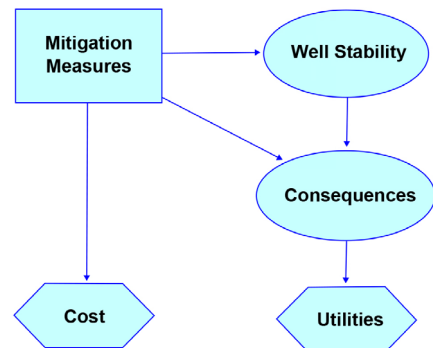


Figure 21 – Bayesian model based on the measurements of the wellbore.

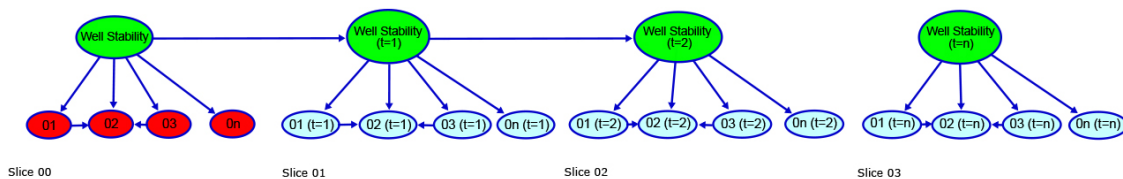


Figure 22 – Modelling the integrity for slice 00.

Once the prediction model is executed, these results determine the optimal remedial measures. An optimal remedial solution can also be to do nothing, i.e. no remedial solution. Figure 23 shows a decision model which evidence permits to evaluate wellbore stability based on the measurements.

As time progresses the same steps are repeated.

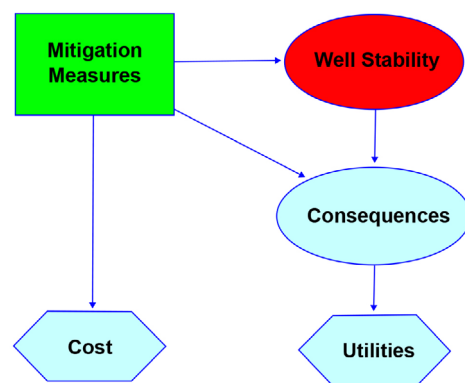


Figure 23 – Bayesian model for the wellbore stability based on the measurements.

6. CONCLUSIONS

Geologic carbon sequestration presents the possibility to reduce emissions of CO_2 into the atmosphere at low cost compared to many other options. In the case of China, the largest emitter of CO_2 , there are good perspectives to storage CO_2 in carboniferous formations, particularly in abandoned coal mines.

Geologic carbon sequestration entails risk that may be large and significant. However risks can be limited or reduced. Development of methodologies for risk evaluation based on BN was presented and some relevant applications were performed.

Based on the applications of BN several conclusions are presented:

- In risk management, BN is a powerful tool in the decision analysis including priori and posteriori analyses.
- BN presented the extension of influence diagrams including the use of decision nodes and utilities nodes.
- BN allows combining the knowledge of experts and available data through statistical methods.
- The beneficial use of DBN in decision processes involving time is very relevant as the application demonstrated.
- The application of DBN can also be very important for the wellbore integrity analysis.

ACKNOWLEDGMENTS

The work at Faculty of Engineering, University of Porto, was financially supported by Base Funding – UICB/04708/2020 and Programmatic Funding – UIDP/04708/2020 of the CONSTRUCT – Institute of R&D in Structures and Construction funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERENCES

- Ang, A.H-S., and Tang, W.H., 1975. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Volume 1, Basic Principles. New York, NY: John Wiley & Sons, 424p.
- Barros, N., Oliveira, G.M., and Lemos de Sousa, M.J., 2012. *Environmental Impact Assessment of Carbon Capture and Sequestration: General overview*. IAIA12 Conference Proceedings: Energy Future of the Role of Impact Assessment, 6p.
- Benson, S., 2005. *Carbon dioxide capture and storage: Overview with an emphasis on geological storage*. Tutorial Presented at the AGU Annual Meeting, 5, San Francisco.
- Celia, M.A., Kavetski, D., Nordbotten, J.M., Bachu, S., and Gasda, S.E., 2006. *Implications of abandoned wells for site selection*. Princeton University, pp.20-22.
- Ciotta, M.R., 2022. CO₂ Geological Storage in Santos Basin: Potential and Best Suitable Sites. In: *Perspectives to CO₂ Geological Storage and Greenhouse Gas Negative Emissions in South-Southeastern Brazil*. Edited by R.M. Musarra, C.C. Tassinari and S.S. Cañas. Blucher Open Access, Chapter 2, pp. 27-39.
- Ciotta, M.R., 2019. *Estudo de possibilidades para armazenar CO₂ em reservatórios offshore na Bacia de Santos*. Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, 170p. (MSc Thesis).
- Cooney, G., Littlefield, J., Marriott, J., and Skone, T., 2015. Evaluating the climate benefits of CO₂-enhanced oil recovery using life cycle analysis. *Environment Science & Technology* 49(12): 7491-7500.
- Dempster, A.P., 1968. A Generalization of Bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 30(2): 205-247.
- Duguid, A., Coueslan, M., and Tombari, J., 2008. *MMV technologies for effective and efficient monitoring of geologic carbon capture and storage projects*. GWPC/US EPA CO₂ MMV Workshop, New Orleans.
- EASAC (European Academies' Science Advisory Council), 2013. *Carbon capture and storage in Europe*. European Academies Science Advisory Council, EASAC poly Report 20, 86p.
- Einstein, H., 2002. *Risk assessment and management in geotechnical engineering*. 8th Portuguese Geotechnical Congress, Lisbon, pp. 2237-2262.
- Elsworth, D., Wang, S., Izadi, G., Kumar, H., Mathews, J., Liu, J.S., Lee, D.-S., and Pone, D., 2012. *Complex process coupling in systems pushed far-from-equilibrium: Applications to CO₂ sequestration in carboniferous formations*. Workshop on CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines, Beijing, pp. 55-67.
- Eskenes, S., Tengborg, P., Kampmann, J., and Veicherts, T., 2004. Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19(3): 217-237.
- Faber, M.H., 2005. *Risk and safety in civil engineering, Surveying and Environmental Engineering*. Lecture Notes. Swiss Federal Institute of Technology, ETHZ, Switzerland. 394p.
- Gomes, A., 2010. *Processos de Injeção de CO₂ em Formações Carboníferas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 116p. (MSc Thesis).
- He, M., 2012. *Considerations on CO₂ storage in abandoned coal mines in China*. Workshop on CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines, Beijing, pp. 25-36.

- He, M., Sousa, L.R., Eslworth, D., and Vargas Jr., E., (editors), 2012. *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines*. Beijing: CRC Press, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, 201p.
- He, M., Sousa, L.R., Sousa, R.L., Gomes, A., Vargas, E., and Zhang, N., 2011. Risk assessment of CO₂ injection processes and storage in carboniferous formations: a review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 3(1): 39-56.
- Heckerman, D., 1997. A Tutorial on learning with Bayesian networks. *Data Mining and Knowledge Discovery* 1: 79-119.
- Henrion, M., Breese, J., and Horvitz, E., 1991. Decision Analysis and Expert Systems. *AI Magazine* 12(4): 64-91.
- Hosseini, S.A., Hamidreza, L., Choi, J.W., Nicot, J.P., Lu, J., and Hovorka, S.D., 2013. Static and dynamic reservoir modelling for geologic CO₂ sequestration at Cranfield, Mississippi, U.S.A. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 18: 449-462.
- Howard, R.A., and Matheson, J.E., (editors), 1984. *Readings on The Principles and Applications of Decision Analysis*. Menlo Park Califórnia: Strategic Decisions Group, 2 volumes, 955p.
- IEA (International Energy Agency), 2016. *20 years of carbon capture and storage: Accelerating future development*. Paris: OECD Publications, 431p.
- IEA (International Energy Agency), 2019. *World energy outlook 2019 – Executive summary*. Paris: International Energy Agency, IEA Publications, 9p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005. *Carbone Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, IPCC Special Report, 431p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018. *Global Warning of 1.5 °C*. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Special Report, 616p.
- Lemos de Sousa, M.J., Rodrigues, C.F., Diogo, M.T., Pinto de Jesus, A., Mouraz Miranda, A., Dinis, M.A.P., Oliveira, G.M., Chaminé, H.I., Dinis da Gama, C., and Arrais, C.M., 2010. Carvões portugueses: A revalorização moderna possível de um recurso geológico. O caso de estudo da Bacia Carbonífera do Douro. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Edited by J.M. Cotelo Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha and Magalhães Ramalho. Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, Geologia Aplicada, Volume II, pp. 157-186. (Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra).
- Miranda, T., 2007. *Geomechanical parameters evaluation in underground structures: Artificial intelligence, Bayesian probabilities and inverse methods*. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 291p. (PhD Thesis).
- Myer, L., 2003. *Geomechanical Risks in Coal Bed Carbon Dioxide Sequestration*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division, 24p.
- Piessens, K., 2012. The conceptual model for an abandoned coal mine reservoir. In: *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines*. Edited by M. He, L. Ribeiro e Sousa D., Elsworth and E. Vargas Jr. Beijing: CRC Press, pp. 179-200.
- Pissens, K., and Duser, M., 2003. Modeling vertical reservoir properties with CO₂/VR. In: *International Coalbed Methane Symposium*, 14p.
- Price, P.N., McKone, T.D., and Sohn, M., 2008. *Carbon sequestration risks and risk management*. Berkeley, Califórnia: Lawrence Berkeley National Laboratory, Environment Energy Technologies Division, 19p.
- Qu, H., Liu, J.S., Chen, Z., Pan, Z., and Connell, L., 2012. A fully coupled gas flow, coal deformation, and thermal transport model for the injection of carbon dioxide into coal seams. In: *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines*. Edited by M. He, L. Ribeiro e Sousa, D. Elsworth and E. Vargas. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, pp. 69-93.
- Rodrigues, C., 2002. *The application of isotherm studies to evaluate the coalbed methane potential to the Waterberg basin, South Africa*. Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 287p. (PhD Thesis).

- Rodrigues, C., Dinis, M.A., and Lemos de Sousa, M.J., 2013. Unconventional coal reservoir for CO₂ safe geological sequestration. *International Journal of Global Warming* 5(1): 46-66.
- Russell, S., and Norvig, P., 2003. *Artificial Intelligence. A modern approach*. New Jersey: Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, Second Edition, 1081p.
- Rutqvist, J., 2012. The Geomechanics of CO₂ Storage in Deep Sedimentary Formations. *Geotechnical and Geological Engineering* 30: 525-551.
- Shi, J.Q., and Durucan, S., 2005. CO₂ Storage in Caverns and Mines. *Oil & Gas Science and Technology* 60(3): 569-571.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., and Ulusay, R., 2003. An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16(3): 251-269.
- Sousa, L.R., 2012a. *Present day conditions in the world of CCS projects*. Beijing: Workshop on CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines, pp. 1-23.
- Sousa, L.R., and Sousa, R.L., 2012. *Risk associated to storage of CO₂ in carboniferous formations*. Application of Bayesian networks. Beijing: Workshop on CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines, pp. 153-178.
- Sousa, L.R., and Sousa, R.L., 2013. *Considerations about Deep Oil and Gas Reservoirs in Pre-Salt Formations. Cases in Brazil and China*. Euro-Asia Regional Energy Round Table & Industry Leadership Summit. Forum 2: Xi'an, 50p.
- Sousa, R.L., 2000. *Knowledge Based System for distress identification and diagnosis in concrete structures*. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (MSc Thesis).
- Sousa, R.L., 2010. *Risk analysis for tunneling projects*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 589p.
- Sousa, R.L., 2012b. Methodologies for risk analysis and decision making. In: *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines*. Edited by M. He, L. Ribeiro e Sousa, D. Elsworth and E. Vargas Jr. Beijing: CRC Press, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, pp. 125-152.
- Sousa, R.L., and Einstein, H.H., 2012. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study. *Tunnelling and Underground Space Technology* 27(1): 86-100.
- Sousa, R.L., Sousa, L.R., Silva, C., and Freitas, V., 2009. *Maintenance Methodologies of Old Railway Tunnels*. In: Conference on New Developments in Rock Mechanics and Engineering, NDRM2009. Sanya, China, pp. 401-406.
- Suwansawat, S., and Einstein, H.H., 2006. Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21(2): 133-150.
- Vargas Jr., E., Velloso, R.Q., Ribeiro, W.N., Ribeiro, W.N., Muller, A.L., and Vaz, L.E., 2012. Considerations on the numerical modelling of injection processes of CO₂ in geological formations with emphasis on carboniferous formations and abandoned coal mines. In: *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines*. Edited by M. He, L. Ribeiro e Sousa, D. Elsworth and E. Vargas Jr. Beijing: CRC Press, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, pp. 107-123.
- Zacharias, L.G., Peyeri, D., Ciotta, M., Pontes, T., and Moretto, E., 2022. *Potential for geological storage of CO₂ associated with pre-salt natural gas: An analyse using the multilevel perspective* (in Portuguese). São Paulo: Project Research Centre for Gas innovation 19: 284-295.
- Zadeh, L., 1999. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 1(1): 3-28. (Reprinted in *Fuzzy Sets and Systems* 100(Supplement 1): 9-34).
- Zhang, N., and Sousa, L.R., 2012. Carbon Capture and Storage (CCS) activities in China. In: *CO₂ Storage in Carboniferous Formations and Abandoned Coal Mines*. Edited by M. He, L. Ribeiro e Sousa, D. Elsworth and E. Vargas Jr. Beijing: CRC Press, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, pp. 37-54.

Robert Wagner (1927 – 2018): Paleobotânico e Estratígrafo

M.J. LEMOS DE SOUSA^{1,2,3*}, CRISTINA F.A. RODRIGUES^{1,2,3} E P.F. MOREIRA^{1,2}

¹ Fundação e Universidade Fernando Pessoa – Instituto de Investigação, Inovação e Desenvolvimento
Fernando Pessoa (FP-I3ID). Porto, Portugal

² MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente. URI Coimbra, Portugal

³ Academia das Ciências de Lisboa (ACL). Lisboa, Portugal

* E-mail: lemosdesousa@gmail.com

RESUMO

Os autores apresentam uma biobibliografia de Robert Herman Wagner Boon (1927 – 2018) pondo em destaque as principais contribuições deste cientista para a Paleobotânica e a Estratigrafia do Paleozoico Tardio, sobretudo do Carbonífero e do Pérmico. Descrevem-se, em pormenor, os estudos efetuados sobre o Carbonífero Continental Português. O artigo inclui uma lista completa, inédita, dos 217 trabalhos publicados por Robert Wagner.

Palavras-chave: Paleobotânica, Estratigrafia, Devónico, Carbonífero, Pérmico, Península Ibérica, Portugal

ABSTRACT

The authors present a bio-bibliography of Robert Herman Wagner Boon (1927 – 2018) with emphasis to its major contributions to Palaeobotany and Late Palaeozoic Stratigraphy, mainly referring to the Carboniferous and Permian. Contributions to the study of Portuguese Terrestrial Carboniferous are also described in detail. The paper includes an unpublished comprehensive list of the 217 publications issued by Robert Wagner.

Key-words: Palaeobotany, Stratigraphy, Devonian, Carboniferous, Permian, Iberian Peninsula, Portugal

1. O CIDADÃO E A SUA CIRCUNSTÂNCIA

Robert Herman Wagner Boon – em Espanha, país onde viveu longos anos e onde desenvolveu uma parte significativa da sua atividade científica – era respeitosa e amavelmente chamado D. Roberto, sendo que, para os amigos e colegas, sempre foi, simplesmente, o Bob – assinou a sua obra publicada como Robert H. Wagner ou R.H. Wagner.

Nasceu em Surabaya, ilha de Java, atual Indonésia, na ocasião sob administração colonial neerlandesa, em 21 de setembro de 1927 e faleceu na sua casa de Córdoba, Espanha, em 7 de fevereiro de 2018.



Robert Herman Wagner Boon (1927-2018) (Fotografia cedida por Carmen Álvarez Vázquez).

No decurso da Segunda Guerra Mundial e durante a ocupação japonesa de Java esteve, durante um total de dois anos e meio, internado, de início num gueto destinado à população branca e, subsequentemente, num campo de concentração. Foram tempos de aprendizagem dura e de sobrevivência quotidiana. Era um homem conservador, austero, franco e direto – e, por vezes, muito teimoso, mesmo intransigente, quanto aos seus pontos de vista científicos. Estes eram, naturalmente, baseados em estudo profundo e em evidências devidamente comprovadas. No entanto, era também completamente aberto a novas ideias e perspectivas, que sempre tomava em consideração para retocar e, por vezes, até modificar os seus “modelos”

ou opiniões – como é timbre de um verdadeiro homem de ciência. Tudo isto a despeito de ser um verdadeiro cavalheiro, sendo de um elevado nível de convivialidade, e de ser um leal e verdadeiro amigo do seu amigo. Como, na prática, não tinha tempos livres, não se lhe conheciam *hobbies* para além do gosto pela cozinha exótica, nomeadamente asiática, que executava com grande competência – importava todos os produtos necessários de lojas especializadas nos Países Baixos – e de estudar História e Geopolítica, designadamente sobre os Descobrimentos neerlandeses e sua comparação com os feitos contemporâneos dos portugueses, temas sobre os quais gostava de discutir, gostosamente, durante horas. Passava todos os longos períodos de férias universitárias britânicas na sua casa de Cervera de Pisuerga, Palência, Espanha onde, para além de receber os amigos e colegas e de os brindar com as suas primícias culinárias, trabalhava em contínuo discutindo e desenvolvendo novas ideias, redigindo e revendo textos e levando a cabo trabalho de campo na Cordilheira Cantábrica.

2. FORMAÇÃO E CARREIRA PROFISSIONAL

Robert Wagner viajou pela primeira vez para a metrópole neerlandesa em 1946 para frequentar Geologia na Universidade de Leiden, onde se demorou até 1953 entre graduação, pós-graduação e outros estudos.

No período 1954-1956, além de ter prestado serviço militar obrigatório, exerceu profissionalmente, como paleobotânico, nos Serviços Geológicos dos Países Baixos, em Heerlen. Entre 1957-1958 exerceu o cargo de geólogo e paleobotânico no Serviço Geológico da Turquia e, no período 1958-1960, como

palinólogo na Royal Dutch Shell, em Delft.

De 1960 em diante passou a desempenhar atividade docente no Departamento de Geologia da Universidade de Sheffield, Inglaterra, Reino Unido, onde exerceu até 1983, ano em que se aposentou oficialmente. Aí ocupou os cargos de *Lecturer*, *Senior Lecturer* e *Reader*, sendo que, após a aposentação, foi distinguido com o título *Honorary Lecturer* tendo, nessa última qualidade, regido cursos especializados em 1984 e 1985.

No decurso da carreira na Universidade de Sheffield doutorou-se, em 1968, na Universidade de Amsterdão com uma tese sobre Aleopterídeas – ainda hoje, considerada uma obra de referência – sob a orientação do seu Mestre, o eminente paleobotânico e estrátigrafo Professor Wilhelmus Josephus Jongmans (1878-1957) – figura maior da Paleontologia vegetal e da Estratigrafia do Carbonífero e um dos míticos pioneiros do *Fossilium Catalogus, II-Plantae*¹ – de quem viria a traçar notáveis elogios acadêmicos (Wagner e Ameron 1995; Wagner 1997).

Robert Wagner nunca conheceu o conceito de aposentação, tendo continuado a exercer atividade ao mesmo ritmo até aos seus últimos dias de vida. Assim, logo após a aposentação oficial da Universidade de Sheffield passou a trabalhar no Jardín Botánico de Córdoba, Espanha, onde, de início, organizou uma Secção de Paleobotânica, na qual depositou a sua coleção pessoal de c. 60.000 exemplares de fósseis vegetais e uma das mais completas bibliotecas, igualmente pessoal, de Paleobotânica e de Estratigrafia. A coleção – integra, atualmente, mais de 120.000 exemplares – e a biblioteca estão, hoje, depositadas no Centro Paleobotánico do IMGEMA – Jardín Botánico de Córdoba, instituição pública dependente do Ayuntamiento de Córdoba, sendo que o museu passou, a partir de 2022, a designar-se

¹ Esta tarefa ciclópica foi continuada por S.J. Dijkstra, H.W.J. van Ameron e outros, ainda se editando volumes atualmente.



Robert Wagner, em 2013, aos 85 anos, participando nas Jornadas de La Sociedad Española de Paleontología em Peñarroya, Córdoba, Espanha (Fotografia cedida por Carmen Álvarez Vázquez).

oficialmente por Museo de Paleobotánica Roberto Wagner. Este conjunto constitui, também hoje, um dos centros internacionais de referência na temática a nível mundial.

Confirmando a inexistência das palavras “aposentação”, “férias” e “descanso” nos vocabulários e dicionários da sua biblioteca, Robert Wagner, aceitou o convite para dirigir o Serviço de Geologia na Empresa Nacional Carbonífera del Sur – ENCASUR, sediado em Peñarroya-Pueblonuevo, em plena Bacia Carbonífera de Peñarroya-Belmez-Espiel, cargo que exerceu entre 1983 e 1992, tendo desencadeado uma verdadeira revolução com a revisão da geologia local – extensível às bacias de Guadiato e de Puertollano, esta última já na província de La Mancha – e a introdução de novas metodologias de investigação, incluindo a Petrologia e Geoquímica Orgânicas (Correia 1993).

A Universidade de Córdoba distinguiu-o, outorgando-lhe o título de Doutor *Honoris Causa* pela Faculdade de Ciências, cuja investidura teve lugar em 11 de dezembro de 1985 (Universidad de Córdoba 1985, s.d.).

3. TÓPICOS DE UMA CARREIRA CIENTÍFICA DESTACADA

A carreira científica de Robert Wagner está plasmada na sua lista completa de trabalhos incluída em ANEXO, na qual pudemos compilar um total de 217 trabalhos (livros, artigos de revista e outros, excluindo livros editados e relatórios), todos de real qualidade, embora de temáticas diferentes e interesse diverso.

Três dos seus mais importantes discípulos (Christopher Cleal, John Knight e Carmen Álvarez-Vázquez) traçaram um recente e muito completo retrato biográfico (Cleal et al. 2019). Pelo que nos toca, passamos a evocar o que consideramos mais importante e significativo da sua carreira científica, pessoalmente acompanhada ao longo de muitos anos de colaboração científica.

Robert Wagner foi, essencialmente, um Paleobotânico e Estratígrafo do Carbonífero e do Pérmico, tendo concentrado a sua atividade principal na Península Ibérica, nomeadamente em Espanha, mas também em Portugal. Mesmo assim, visitou o terreno e estudou floras fósseis do Paleozoico de todo o mundo: Alemanha (Sarre), Arábia Saudita, Argentina, Canadá, Chéquia (Boémia), Estados Unidos da América, França, Gronelândia, Países Baixos, Reino Unido e Turquia (Anatólia), sendo neste caso, muito especialmente, de destacar as suas contribuições para o estudo de zonas de floras mistas, ou seja, com elementos correspondentes a diferentes unidades paleográficas, de que são exemplo tipo as floras de Cathaysia e de Gondwana que ocorrem na Anatólia.

Como Paleobotânico, Robert Wagner, não foi apenas um brilhante taxinomista (autor e/ou revisor de numerosas espécies), mas sim, também, um Paleoecologista, pioneiro na aplicação da Biostratigrafia às floras do Carbonífero e do Pérmico, em contexto sedimentar de fácies continental.

Neste enquadramento e tendo reunido, no decurso de uma já longa experiência e acumulação de dados suficientes, apresentou no IX *International Congress of Carboniferous*

Stratigraphy and Geology uma importantíssima comunicação, pela primeira vez, na qual propõe uma pormenorizada biozonação de macrofloras fósseis do Carbonífero Continental Norte-Atlântico. Retomando o assunto no discurso de agradecimento pela investidura como Doutor *Honoris Causa* pela Universidade de Córdoba (Wagner 1986) e, com as devidas atualizações, em Wagner e Álvarez-Vázquez (2010), a aplicação das Biozonas de Wagner em conjugação com o “método do balanço florístico” de Vetter (1972) ao Carbonífero Continental Norte-Atlântico levou a que, hoje, Robert Wagner seja considerado a figura líder da Biostratigrafia das macrofloras do Paleozoico Tardio, na segunda metade do século XX.

De par e passo com a temática da biozonação há, ainda, que registrar as contribuições do nosso homenageado no campo da Paleocologia, no que respeita à discussão da presença de “elementos exteriores à bacia” (os *extrabasinal elements* dos autores de língua inglesa), a que se referiu ou a que consagrou várias publicações, as quais, ainda hoje, são motivo de discussão e, mesmo, de controvérsia (DiMichele et al. 2025).

Um outro tema básico, ao qual Robert Wagner consagrou boa parte da sua atividade científica, foi o da Cronostratigrafia do Carbonífero e do Pérmico, a nível tanto da Península Ibérica como global e, como não podia deixar de ser, em perfeita concatenação com estudos biostratigráficos acima referidos. Segundo o nosso cômputo, consagrou ao assunto nada menos de que 24 publicações, para além de ser editor da obra monográfica *The Carboniferous of the World*².

Robert Wagner foi, de resto, um participante ativo no âmbito da *Subcomission on Carboniferous Stratigraphy* da *International Union of Geological Sciences – IUGS*, subcomissão esta que secretariou desde 1963, passando à presidência que exerceu no período 1983-1987.

Dentre as suas contribuições na área da Cronostratigrafia do Carbonífero e do Pérmico destacamos o seguinte:

(i) O reconhecimento de que a fronteira Vestefaliano-Estefaniano não correspondia ao clássico “Conglomerado de Holz” na Bacia da Lorena, França, uma vez que a série continental mais completa estudada está representada na Cordilheira Cantábrica. Daqui resultou a proposta de um novo andar na base do Estefaniano, para o qual propôs o nome de Cantabriano³. Com o decorrer do tempo e o avanço da investigação, foram sucessivamente propostos, os andares Barrueliano³ e Saberiano³ com vista a incorporar os até aí designados, Estefaniano A e Estefaniano B, respetivamente.

(ii) A revisão do Vestefaliano que, por sua vez, levou à proposta do andar Asturiano³, neste caso, a título de revisão do Vestefaliano D.

²Foram publicados três volumes (Martinez Diaz et al. 1983, 1985, 1996), sendo que “por ironia do destino” o quarto volume – precisamente aquele previsto para ser consagrado à Euroamérica, onde se baseia a maior parte das suas contribuições – acabou por nunca sair a lume.

³ Todas estas entidades cronostratigráficas têm, hoje, a categoria de subandar.

Trata-se, assim, de propostas para quatro novos andares³ – Cantabriano (Wagner 1969; Bouroz et al. 1970; Wagner et al. 1977; Wagner e Winkler Prins 1985), Barrueliano (Wagner e Winkler Prins 1985), Saberiano (Knight e Wagner 2014) e Asturiano (Wagner et al. 2002) – dos quais, os dois primeiros, estão adotados oficialmente e, os dois últimos, ainda em discussão.

É, aliás, toda esta atividade que justifica a elaboração e publicação de sucessivas propostas de refinamento e atualização nos quadros estratigráficos, com especial ênfase no estudo de correlações tanto inter-regionais, como nos quadros aplicáveis, quer à Europa Ocidental, quer de referência, i.e, relativo ao sistema dito internacional, neste último caso correspondente à série marinha completa russa. As últimas versões dos quadros são as que constam das publicações de Wagner e Winkler Prins (2016) e de Wagner (2017), patentes no Quadro 1, indispensáveis quando se trate de classificar formações do Carbonífero exclusivamente de fácies continental, na Europa Ocidental. O tema acha-se tratado e discutido em pormenor em Cardoso et al. (2023a,b).

Quadro 1 – Quadro das Divisões Estratigráficas do Carbonífero da Europa Ocidental e sua correlação com o sistema internacional (Cardoso et al. 2023a,b).



Quadro das Divisões Estratigráficas do Carbonífero da Europa Ocidental e sua correlação com o sistema internacional

Sistema Período	Internacional			Regional: Europa Ocidental			
	Subsistema Subperíodo	Série Época	Andar Idade	Subsistema Subperíodo (a)	Andar Idade	Subandar Subidade	
CARBONÍFERO	Pensilvaniano	Superior	Gzheliano	Silesiano	Estefaniano	Autuniano	
			Kasimoviano			Estefaniano C	
		Médio	Moscoviano			Estefaniano B	
						Saberiano	
						Barrueliano	
						Cantabriano	
		Vestefaliano	Asturiano (b)				
			Bolsoviano (c)				
			Duckmantiano (d)				
			Langsettiano (e)				
	Mississippiano	Superior	Serpukhoviano	Dinantiano	Namuriano	C	Leadoniano
						B	Marsdeniano
		Kinderscoutiano					
		Médio	Viseiano		A	Alportiano	
						Chokeriano	
Arnsbergiano							
Inferior	Tournaisiano	Pendleiano					
				Viseiano			
				Tournaisiano			

M.J. Lemos de Sousa e Ana Salgado, 2023

(a) Apesar de a Subcomissão de Estratigrafia do Carbonífero do IUGS ter recomendado o abandono da utilização dos dois termos correspondentes aos dois subsistemas clássicos da Europa Ocidental, continuam a ser correntemente utilizados, nomeadamente no Reino Unido, uma vez que se encontram bem adaptados à estratigrafia regional da Europa Ocidental.

(b) Antigo Vestefaliano D; (c) Antigo Vestefaliano C; (d) Antigo Vestefaliano B; (e) Antigo Vestefaliano A.

Formações inteiramente de fácies continental na Europa Ocidental, nomeadamente, na Península Ibérica.

Nota:

A propósito da transição Carbonífero-Pérmico e tendo em conta o acima registado faz-se notar que quando Carlos Teixeira (Teixeira 1944, 1954), aliás no seguimento dos trabalhos pioneiros de Wesceslau de Lima, data a Bacia do Buçaco do Autuniano, está, na época, implicitamente a assumir que se trata do enquadramento da bacia no Pérmico. Todavia, quando, hoje, dizemos que a mesma bacia data do Autuniano estamos a sustentar que a datação corresponde à do subandar Autuniano do andar Estefaniano, pertencente, obviamente, ao Carbonífero e não ao Pérmico.

Para alguns, o assunto continua em aberto – talvez – mas, quanto a nós desenganam-se aqueles que querem ver no *Autunia conferta* (Sternberg) Kerp & Haubold (ex-*Callipteris conferta*) um fóssil-guia, cuja presença ou ausência, define a atribuição de uma qualquer formação ao Pérmico ou ao Carbonífero, respetivamente. Na verdade, pertence ao passado o critério de utilizar espécies guia, em contexto de floras fósseis, ocorrendo em formações de fácies continental. O tempo é o de aplicação conjunta dos critérios da Paleoecologia com a definição de biozonas e a sua aplicação no enquadramento do “método do balanço florístico de Vetter” como acima apontado. A metodologia proposta por Robert Wagner tem, pois, neste caso, plena razão de ser.

A esta conjuntura há que acrescentar a revisão da fronteira Carbonífero-Pérmico, na prática, hoje reduzida a saber se o Autuniano³ deve ou não deixar de ser o último dos subandares do Estefaniano no enquadramento do período Carbonífero ou, antes, ser incorporado como o primeiro dos subandares do Pérmico. O tema tem, de resto, um bem conhecido e pesado historial, passando pela proposta francesa, nunca adotada, do Estefaniano D de Bouroz e Doubinger (1977).

Por último, refira-se que foi orientador das seguintes nove teses de doutoramento:

- (i) No Departamento de Geologia da Universidade de Sheffield, Reino Unido:
 - Spinner, E.G., 1964. Megaspores and Miospores from the Forest of Dean Coalfield.
 - Riding, R.E., 1970. Palaeoecology and Petrology of Middle Carboniferous Limestones and Stratigraphy of the Associated Sedimentary Sequence, South Central Cantabrian Mountains, Spain.
 - Ambrose, T., 1972. The Stratigraphy and Structure of the Pre-Carboniferous Rocks North West of Cervera de Pisuerga, Cantabrian Mountains, Spain.
 - Knight, J.A., 1975. The Systematics and Stratigraphic Aspects of the Stephanian Flora of the Sabero Coalfield, León (NW Spain).
 - Bowman, M.B.J., 1981. The Sedimentology and Stratigraphy of the San Emiliano Formation and Associated Sequences, Carboniferous, NW Spain.
 - Iwaniw, E., 1984. The Sedimentology and Floral Palaeoecology of Lower Cantabrian Basin Margin Deposits in NE León, Spain.
 - Cleal, C.J., 1985. The Cyclopteridaceae (Medullosales, Pteridospermopsida) of the Carboniferous of Saarland, Federal Republic of Germany.

(ii) Após aposentação como docente da Universidade de Sheffield e fixação de residência em Espanha:

- Álvarez-Vázquez, C., 1995. Macroflora del Westfaliense inferior de la cuenca de Peñarroya-Belmez-Espiel (Córdoba). Departamento de Geología, Universidade de Oviedo (Codirigida por M. Arbizu).
- Castro, M.P., 2003. Análisis de la flora Estefaniense B de la cuenca carbonífera de La Magdalena (León, España). Universidade Complutense de Madrid (Codirigida por J. Talens).

Concluindo, valerá a pena lembrar que, para além do referido, no decurso da sua longa e laboriosa carreira, o nosso homenageado dedicou, ainda, atenção a outros temas, desde a cartografia geológica e à divulgação científica e de boas práticas pedagógicas.

4. CONTRIBUIÇÕES PARA A GEOLOGIA E A PALEONTOLOGIA PORTUGUESAS

Desde que, nos anos 60 e 70 do século XX, um de nós (MJLS) encetou o estudo petrológico do carvão da Bacia Carbonífera do Douro (BCD), logo se tornou patente a necessidade de uma revisão aprofundada da Estratigrafia, Estrutura e Paleontologia da bacia. De facto, o estudo do carvão da BCD, levado a efeito no enquadramento da introdução, em Portugal, dos estudos da Petrologia e Geoquímica Orgânicas moderna, teve por objetivo as duas componentes tradicionais da Petrologia, ou seja, o estudo petrográfico e geoquímico em conexão com a componente genética, sendo que este último aspeto só pode ser abordado tendo em conta a estrutura da bacia.

Na verdade, na sequência dos trabalhos pioneiros de Carlos Ribeiro (Lemos de Sousa et al. 2013), Bernardino António Gomes, Oswald Heer, Wenceslau de Lima, e outros, foi Carlos Teixeira que elaborou uma primeira síntese, correspondente à sua tese de doutoramento (Teixeira 1944), trabalho este retomado uma década depois (Teixeira 1954), assim se completando um ciclo no conhecimento do Carbonífero Continental português.

Esta situação levou à preparação de uma monografia de revisão não apenas da BCD, mas sim, extensiva a todo o Carbonífero português, intitulada *The Carboniferous of Portugal*, tendo em vista a sua apresentação no *X International Congress of Carboniferous Stratigraphy and Geology*, realizado em Madrid, em 1983 (Lemos de Sousa e Oliveira 1983), assim como veremos, se iniciando num novo ciclo no conhecimento do Paleozoico final português. Robert Wagner, por sua vez, deu largo contributo para a organização do volume em causa e nele publicou três artigos: um sobre a descrição geral das bacias e afloramentos do Carbonífero Continental português (Lemos de Sousa e Wagner 1983a), outro consagrado ao estudo das respetivas megafloras (Wagner e Lemos de Sousa 1983a) e, um terceiro, de síntese comparativa da paleogeografia e das relações cronológicas das ocorrências de Carbonífero Continental no Oeste peninsular (Wagner 1983).



Robert Wagner, na década de 80 do século XX, nas caves dos então Serviços Geológicos de Portugal, surpreendido, em plena tarefa de revisão da flora fóssil carbonífera portuguesa (Fotografia de M.J. Lemos de Sousa).

O estudo monográfico referido foi cronologicamente precedido de dois artigos: um relativo à caracterização e às biozonas do *Linopteris florini* Teixeira e do *Linopteris gangamopteroides* (De Stefani) Wagner (Wagner e Lemos de Sousa 1982b) e, outro, à revisão da megaflora do afloramento carbonífero de Casais-Alvarelhos/Serra do Bougado (Wagner e Lemos de Sousa 1982a).

O volume de trabalho, na altura levado a efeito, no que respeita à revisão da Geologia e Paleontologia do Carbonífero Continental Ibérico, acabou por justificar a elaboração de duas outras monografias – ambas organizadas pelo Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências do Porto e dedicadas à memória de Wenceslau de Sousa Pereira de Lima – consagradas à mesma temática (Lemos de Sousa 1983a; Lemos de Sousa e Wagner 1985b). Nestas duas novas monografias, Robert Wagner e colaboradores publicaram novos artigos de revisão, sendo os seguintes dedicados à componente portuguesa:

- (i) No volume editado por Lemos de Sousa (1983a):
 - Um capítulo consagrado à revisão da Geologia e Paleontologia da Bacia do Buçaco (Wagner et al. 1983);
 - Um capítulo sobre a megaflora do Couto Mineiro do Pejão (Lemos de Sousa e Wagner 1983b);
 - Um capítulo, de índole essencialmente paleobotânica, sobre duas raras espécies de Pecopterídeas (Wagner e Lemos de Sousa 1983b).

(ii) No volume editado por Lemos de Sousa e Wagner (1985b):

- Um capítulo contendo a revisão da “Coleção Bernardino António Gomes” do acervo do Museu Nacional de História Natural (Lemos de Sousa e Wagner 1985a);
- Um capítulo consagrado à *Oligocarpia leptophylla* (Bunbury) Grauvogel – Stamm & Doubinger, planta mítica, cuja complexa história nomenclatural (identificamos 49 referências em sinonímia e 7 referências de *specimina excludenda*) pensamos, por fim, ter conseguido decifrar e ordenar. Na verdade, quanto a nós, a referida nomenclatura teve início, a partir de 1890, com a atribuição errada desta planta ao género *Sphenopteris* por parte de Renault e Zeiller, atribuição errada esta que, dado o imenso prestígio – aliás justificado – destes cientistas, ninguém sequer se preocupou em verificar até aos anos 70 do século XX! O holótipo, originário do Vale de Candozo, Bacia do Buçaco (Estefaniano C Tardio/Autuniano Inicial), enviado por Carlos Ribeiro a Bunbury e, por ele, originalmente descrito, em 1853, deveria estar depositado no estudo do Museu Britânico de Londres. Está, porém, desaparecido, motivo pelo qual os autores designaram como lectótipo, o exemplo que puderam estudar e que se encontra depositado no Departamento de Botânica da Universidade de Cambridge (Coleção Bunbury n.º 422) (Wagner e Lemos de Sousa 1985).

Ainda em relação com este ciclo de revisão do Carbonífero Continental português, Robert Wagner foi convidado a participar no grupo de trabalho (Robert Wagner, António Ribeiro e Manuel Lemos de Sousa) encarregado de se pronunciar sobre o futuro da BCD e, nomeadamente, do setor Germunde-Choupelo do Couto Mineiro do Pejão. Os resultados desta tarefa ficaram registados em três relatórios: o primeiro relativo à reinterpretação da geologia do setor Germunde-Serrinha do Couto Mineiro do Pejão (Wagner et al. 1984), os outros dois (Wagner et al. 1985, 1987) equacionam o estado de avanço dos conhecimentos, entretanto obtidos, e fazem recomendações para o prosseguimento dos trabalhos mineiros.

Já em fim de carreira, aquando da publicação de trabalhos de síntese e revisão, Robert Wagner teve a oportunidade de integrar, em alguns deles, os conhecimentos adquiridos no estudo das floras fósseis portuguesas. É o caso da síntese sobre as floras fósseis do Carbonífero ibérico e do seu valor cronostratigráfico (Wagner e Álvarez-Vázquez 2010)⁴ e de idêntico trabalho sobre as floras devónicas (Wagner 2012).

⁴ No que respeita à distribuição estratigráfica das floras carboníferas portuguesas, tal como apresentadas neste trabalho, há que ter em atenção as múltiplas modificações introduzidas na classificação dos andares/subandares nas sucessivas edições dos Quadros das Divisões Estratigráficas do Carbonífero da Europa Ocidental e sua correlação com o sistema internacional, cuja última versão se deve a Wagner e Winkler Prins (2016) e Wagner (2017). (Veja-se, também, Cardoso et al. 2023a,b).



Numa galeria da Mina de Germunde (Couto Mineiro do Pejão), em 1984. Robert Wagner explicando as duas fases de sedimentação do Carbonífero correspondentes aos “complexo do muro” e “complexo do teto”, a existência de um conglomerado intracarbonífero e o enquadramento estrutural geral. Na fotografia, para além, do homenageado é possível identificar o, então, diretor técnico do Couto Mineiro, (Eng. Rui Marrana) e um dos autores (MJLS) (Fotografias de M.J. Lemos de Sousa).

Onotável acervo acima registado, iniciado com a publicação, em 1983, do livro *The Carboniferous of Portugal* (Lemos de Sousa e Oliveira 1983) corresponde, quanto a nós, a um segundo ciclo no conhecimento do Carbonífero Continental português e ibérico em geral, todo ele levado a cabo, como vimos, com a colaboração de Robert Wagner. Etapa esta que abriu os caboucos de um novo e terceiro ciclo do conhecimento, ainda hoje em curso, sobre a Estratigrafia, a Tectónica, a Paleontologia e, ainda, sobre temas do foro ambiental, nas três bacias portuguesas datadas do Carbonífero: Douro, Buçaco e Santa Susana. Este novo e terceiro ciclo teve, quanto a nós, início com a vinda a público da tese de doutoramento de Pinto de Jesus (2001)⁵ sobre a Estratigrafia e a génese da Bacia Carbonífera do Douro, sem dúvida a mais importante das três bacias acima apontadas. Entretanto, foram dadas à estampa numerosas publicações, cuja referência não se enquadra, obviamente, na índole do presente trabalho, sendo que este outro importante conjunto⁶ se acha inventariado em duas publicações cronologicamente complementares: Pinto de Jesus et al. (2010) e o primeiro capítulo do presente volume (Lemos de Sousa et al. 2025).

Notas:

1. Do ponto de vista metodológico, valerá, talvez, a pena deixar aqui registado que, no ciclo de desenvolvimento de estudos sobre o Carbonífero Continental português, em que interveio Robert Wagner, foram registados outros grandes progressos no conhecimento das bacias do Douro e do Buçaco, para além dos conseguidos com a revisão pormenorizada das floras fósseis.
2. Na realidade, para além, da introdução da Petrologia e Geoquímica Orgânicas moderna entre nós e dos significativos avanços no conhecimento das antracites mais evoluídas do Continente Norte-Atlântico (Alpern e Lemos de Sousa 1970; Lemos de Sousa 1983b; Lemos de Sousa et al. 2010), facto este mais recentemente confirmado por Marques et al. (2009) – o que permitiu, aliás, a Alpern e Lemos de Sousa (1970), propor uma definição para a Antracite A, então designada por perantracite ou metantracite – há que registar os progressos sucessivamente obtidos no conhecimento da própria génese e estrutura da Bacia do Douro tendo, *avant la lettre*, como única base os resultados do estudo petrológico dos carvões, tal como registado, por exemplo, em Lemos de Sousa (1978a,b).

Por outro lado, foi, entretanto, possível definir o modelo tectónico global das diversas bacias, com especial ênfase para a que patenteia maior complexidade estrutural, ou seja, a Bacia do Douro. Os resultados alcançados estão registados em Domingos et al. (1983), sendo ainda de assinalar a fixação e definição de pormenor dos acidentes tectónicos maiores em Wagner

⁵ Veja-se, também, Pinto de Jesus (2003).

⁶ Pela sua importância, achamos que se deve aqui referir que deste conjunto de publicações se destaca não só a tese de doutoramento que introduziu, entre nós, os estudos de Paleobotânica no moderno enquadramento da Paleoecologia (Correia 2016), mas também, uma recente síntese do Carbonífero Continental português editada como capítulo da obra de referência *The Geology of Ibéria: A Geodynamic Approach*, editada por Cecílio Quesada e José Tomás de Oliveira (Pinto de Jesus 2019).

et al. (1984). O modelo geral, a que nos vimos referindo, foi subsequentemente plenamente confirmado e harmoniza-se, aliás, com os resultados do estudo petrográfico do carvão nos termos das aplicações geológicas do poder refletor da vitrinite definidas em Alpern (1967, 1987). Na verdade, foi o desenvolvimento desta metodologia baseada no estudo petrográfico dos carvões que permitiu a Lemos de Sousa (1977, 1978b) o seguinte:

- (i) Confirmar a existência na Bacia do Douro de dois episódios de sedimentação correspondentes ao que designou, na zona mais bem estudada, i.e., na Bacia Carbonífera do Douro, por “Feixe do muro” e “Feixe do teto”, separados por um episódio sedimentar representado por um “conglomerado intracarbonífero”, que, no setor de São Pedro da Cova, corresponde ao designado “Conglomerado do Poço n.º 3” (Fonseca 1953). Baseado na sua experiência na geologia local, Freire (1947) já havia levantado a hipótese de na zona do Couto Mineiro do Pejão, existirem dois complexos (“do muro” e “do teto”) de camadas. Todavia, num pacote estratigráfico, cuja possança é, apenas, da ordem das centenas de metros, não é possível admitir o modelo tectónico baseado em dobramentos que então propôs.
- (ii) Confirmar que a “Bacia Oriental”, que ocorre na região de São Pedro da Cova, se formou a partir da “Bacia Clássica”; contudo, não através de um esquema de dobras (Fonseca 1959), mas sim, pela formação de escamas tectónicas (Lemos de Sousa 1977).

*
* * *

Sic transit gloria mundi reza a expressão latina que se associa, frequentemente, ao traçado de biografias de figuras destacadas, muitas vezes, certamente no intuito de relativizar, quando não, mesmo, de denegrir os êxitos obtidos pelo homenageado. Contudo, Robert Wagner, pelo que alcançou — ou melhor, conquistou — pelo seu trabalho, desempenho profissional e postura humana e humanista, tem pleno direito à láurea científica. A ela nos associamos, justamente, com a presente contribuição.

AGRADECIMENTOS

À Fundação e Universidade Fernando Pessoa, que, através da estrutura de coordenação para a investigação, o Instituto de Investigação, Inovação e Desenvolvimento Fernando Pessoa (FP-I3ID), autorizou a inclusão do presente estudo no seu plano de trabalho.

À colega Carmen Álvarez Vázquez do Jardín Botánico de Córdoba, Espanha, pela amável e sempre diligente colaboração e disponibilidade para nos facilitar informações e todo o tipo de documentação sobre o biografado.

REFERÊNCIAS

- Alpern, B., 1967. *Quelques applications géologiques du pouvoir réflecteur des charbons*. Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France, Verneuil-en-Halatte, 22p. (Document intérieur CERCHAR N.º 1562).
- Alpern, B., 1987. Applications de la pétrographie des organoclastes à l'histoire géologique et thermique des bassins sédimentaires carbonés. *Mémoires de la Société Géologique de France* 151(Nouvelle série): 55-75.
- Alpern, B., e Lemos de Sousa, M.J., 1970. Sur le pouvoir réflecteur de la vitrinite et de la fusinite des houilles. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances Académie des Sciences (Paris). Sciences naturelles* 271(D): 956-959.
- Bouroz, A., e Doubinger, J., 1977. Report on the Stephanian-Autunian Boundary and on the Contents of Upper Stephanian and Autunian in their Stratotypes. In: *Symposium on Carboniferous Stratigraphy*. Editado por V.M. Holub e R.H. Wagner. Prague: Geological Survey, pp. 147-169.
- Bouroz, A., Gras, H., e Wagner, R.H., 1970. À propos de la limite Westphalien-Stephanien et du Stéphanien inférieur. In: *Colloque sur la Stratigraphie du Carbonifère*. Editado por M. Streel e R.H. Wagner. Congrès et Colloques de l'Université de Liège 55: 205-225.
- Cardoso, J.L., Dias, R., Lemos de Sousa, M.J., Moreira, P., Rodrigues, C.F.A., e Salgado, A., 2023a. Estratigrafia II – Quadros das Divisões Estratigráficas. Editado por M.J. Lemos de Sousa e Ana Salgado. In: *Thesaurus de Ciências da Terra*. Editado por M.J. Lemos de Sousa, M. Telles Antunes e Ana Salgado. 1.ª edição. Lisboa: Academia das Ciências de Lisboa, 113p. (ISBN: 978-972-623-412-8).
- Cardoso, J.L., Dias, R., Lemos de Sousa, M.J., Moreira, P., Rodrigues, C.F.A., e Salgado, A., 2023b. Quadros das Divisões Estratigráficas. Vade-Mécum. Editado por M.J. Lemos de Sousa e Ana Salgado. In: *Thesaurus de Ciências da Terra*. Editado por M.J. Lemos de Sousa, M. Telles Antunes e Ana Salgado. 1.ª edição. Lisboa: Academia das Ciências de Lisboa, 35p. (ISBN: 978-972-623-413-5).
- Cleal, C.J., Knight, J., e Álvarez-Vázquez, C., 2019. Professor Robert Herman Wagner (1927-2018). *Review of Palaeobotany and Palynology* 261: 103-105.
- Correia, Maria Manuela Coelho Marques Barbosa, 1993. Contribuição para o conhecimento da petrologia dos carvões da Bacia de Peñarroya-Belmez-Espiel (Córdoba-Espanha). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2 volumes, Volume 1 – Texto (157p.), Volume 2 – Quadros, Figuras e Estampas (215p.). (Tese de Doutoramento).
- Correia, P.A. Pereira, 2016. *Contribution to the knowledge of the fossil flora and fauna of the Douro Carboniferous Basin (NW of Portugal)*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, 227p. (Tese de Doutoramento).
- DiMichele, W.A., Gastaldo, R.A., Lucas, S.G., e Pfefferkorn, H.W., 2025. Climate, not transport from “uplands” or “extrabasinal lowlands”, is the cause of drought-tolerant terrestrial organisms in the late Paleozoic fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 676: 113160.
- Domingos, L.C.G., Freire, J.L.S., Gomes da Silva, F., Gonçalves, F., Pereira, E., e Ribeiro, A., 1983. The structure of the intramontane Upper Carboniferous Basins in Portugal. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal, N.º 29, pp. 187-194.
- Fonseca, Neftali da Costa, 1953. Nota sobre um conglomerado carbonífero da Mina de S. Pedro da Cova. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal* XI: 65-68.
- Fonseca, Neftali da Costa, 1959. A propósito dos carvões da zona Oriental da bacia carbonífera de São Pedro da Cova. *Revista da Faculdade de Engenharia do Porto* 24(1): 3-19.
- Freire, J.L.S., 1947. Algumas estruturas e tectónica especial do Jazigo de carvão do Pejão. In: *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*. República Portuguesa, Ministério da Economia, Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos III(4): 232-251.

- Knight, J.A., e Wagner, R.H., 2014. Proposal for the recognition of a Siberian Substage in the mid-Stephanian (West European chronostratigraphic scheme). *Freiberger Forschungshefte* C548(22): 179-195.
- Lemos de Sousa, M.J., 1977. Sobre alguns problemas do Permo-Carbónico continental português. *Ciências da Terra* 3: 9-22.
- Lemos de Sousa, M.J., 1978a. *Contribution à l'étude du bassin houiller du Douro (NW du Portugal)*. Atlas de micropétrographie des peranthracites. Memórias Serviços Geológicos de Portugal, N.º 26 (Nova série), 92p., 36 Pls.
- Lemos de Sousa, 1978b. O grau de incarbonização (*rang*) dos carvões durienses e as consequências genéticas, geológicas e estruturais que resultam do seu conhecimento. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal* LXIII: 179-365.
- Lemos de Sousa, M.J., (Editor), 1983a. *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula*. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências Mineralogia e Geologia, 259p.
- Lemos de Sousa, M.J., 1983b. Petrological characteristics of the Upper Stephanian coals in North Portugal (Douro Coalfield) and their relevance to coalification studies. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias Serviços Geológicos de Portugal 29: 195-205.
- Lemos de Sousa, M.J., e Oliveira, J.T., (Editores), 1983. *The Carboniferous of Portugal*. Lisboa: Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal, Direção Geral de Geologia e Minas, Número 29, 211p.
- Lemos de Sousa, M.J., Marques, M., Flores, D., e Rodrigues, C.F., 2010. Carvões portugueses: Petrologia e Geoquímica. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Editado por J.M. Coteló Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha e M. Magalhães Ramalho. Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, Geologia Clássica, Vol. 1, pp.291-311. (Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra).
- Lemos de Sousa, M.J., Pinto de Jesus, A., Chaminé, H.I., e Rodrigues, C.F., 2013. Carlos Ribeiro e o Carvão em Portugal. In: *Carlos Ribeiro (1813-1882), Geólogo e Arqueólogo*. Homenagem da Câmara Municipal de Oeiras e da Academia das Ciências de Lisboa nos 200 anos do seu nascimento. Estudos Arqueológicos de Oeiras, Volume 20, pp.137-154.
- Lemos de Sousa, M.J., Rodrigues, C.F.A., e Moreira, P.F., 2025. Bacia Carbonífera do Douro: Novos desenvolvimentos. Inventário dos progressos 2010-2025 e introdução ao presente volume. In: *Memórias da Academia das Ciências de Lisboa*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e Cristina Rodrigues. Academia das Ciências de Lisboa, Monografia 6: pp. 1-16.
- Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1983a. General description of the terrestrial Carboniferous basins in Portugal and history of investigations. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal 29: 117-126.
- Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1983b. Precisoões sobre a flora fóssil do Couto Mineiro do Pejão da mina Paraduça nº1 (Bacia Carbonífera do Douro). In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula*. Editado por M.J. Lemos de Sousa. Porto, Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp.157-170.
- Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1985a. Annotated Catalogue of the Bernardino António Gomes fossil plant collection in Lisbon. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Porto, *Anais Faculdade de Ciências do Porto* 64(1983): 411-434.
- Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R., (Editores), 1985b. *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics and Geochronology)*. Supplement to volume 64 (1983). Special Volume in Honour of Wenceslau de Lima, Palaeobotanist and Statesman (1858-1919). Universidade do Porto, *Anais da Faculdade de Ciências*, 498p.

- Marques, M., Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Guedes, A., e Rodrigues, S., 2009. Correlation between optical, chemical and micro-structural parameters of high-rank coals and graphite. *International Journal of Coal Geology* 77(3-4): 377-382.
- Martinez Diaz, C., Wagner, R.H., Winkler Prins, C.F., e Granados, L.F., (Editores), 1983. *The Carboniferous of the World*. Volume I – China, Korea, Japan e S.E. Asia. Instituto Geologico y Minero de España e Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., IUGS Publicação n.º 16, 242p.
- Martinez Diaz, C., Wagner, R.H., Winkler Prins, C.F., e Granados, L.F., (Editores), 1985. *The Carboniferous of the World*. Volume II – Australia, Indian subcontinente, South Africa, South America, e North Africa. Instituto Geologico y Minero de España e Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., IUGS Publicação n.º 20, 447p.
- Martinez Diaz, C., Wagner, R.H., Winkler Prins, C.F., e Granados, L.F., (Editores), 1996. *The Carboniferous of the World*. Volume III – The Former USSR, Mongolia, Middle Eastern Platform, Afghanistan, e Iran. Instituto Geologico y Minero de España e Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., IUGS Publicação n.º 33, 521p.
- Pinto de Jesus, A., 2001. *Génese e evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): Um modelo*. Universidade do Porto, 2 volumes, Volume 1 (232p.) + Atlas, Volume 2 (71p.). (Tese de Doutoramento).
- Pinto de Jesus, A., 2003. Evolução sedimentar e tectónica da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal). *Cadernos do Laboratório Xeológico de Laxe (Coruña)* 28: 107-125.
- Pinto de Jesus, A., 2019. Carboniferous intermontane basins of Portugal. In: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*. Editado por C. Quesada e J. T. Oliveira. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Volume 2, pp. 402-408.
- Pinto de Jesus, A., Lemos de Sousa, M.J., Chaminé, H.I., Dias, R., Fonseca, P.E., e Gomes, A., 2010. O Carbonífero em Portugal. In: *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Editado por J.M. Cotelto Neiva, A. Ribeiro, L. Mendes Victor, F. Noronha e M. Magalhães Ramalho. Volume I: Geologia Clássica. Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Sociedade Geológica de Portugal, pp. 341-355. [Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra].
- Teixeira, C. 1944. O Antracólítico continental português (Estratigrafia - Tectónica). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 139p. (Tese de doutoramento).
- Teixeira, C., 1954. *Notas sobre Geologia de Portugal. O Sistema Permo-Carbónico*. Universidade de Lisboa, 55p.
- Universidad de Cordoba, s.d. *Acto de investidura del grado de Doctor "Honoris Causa" por la Universidad de Córdoba al Profesor Doctor Robert Herman Wagner Boon*. Universidad de Cordoba, 137p.
- Universidad de Cordoba, 1985. *Ceremonial para la investidura de Doctor «Honoris Causa» del Prof. Dr. Robert Herman Wagner Boon*. Universidad de Cordoba, 50p.
- Vetter, P., 1972. Réflexions sur la valeur stratigraphique des plantes fossils et sur celle des cinérites dans la cadre de l'étude des bassins houillers. Methode du bilan floristique. Paris: Colloque sur les méthodes et tendances de la stratigraphie (Orsay). *Mémoire Bulletin du Bureau de recherches géologiques et minières* 77(1): 515-519.
- Wagner, R.H., 1969. Proposal for the recognition of a new "Cantabrian" Stage at the base of the Stephanian Series. *Compte Rendu 6^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Sheffield 1967) I: 139-150.
- Wagner, R.H., 1983. The palaeogeographical and age relationships of the Portuguese Carboniferous floras with those of other parts of the Western Iberian Peninsula. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. *Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal* 29: 153-177.
- Wagner, R.H., 1986. *La Paleobotánica Hullera, sus aspectos botánicos, estratigráficos y paleogeográficos, floras neopaleozoicas del SW de España*. Universidad de Córdoba, Cerimónia de Investidura do grau de Doutor *Honoris Causa*, dezembro 1985, 137p.

- Wagner, R.H., 1997. Wilhelmus Josephus Jongmans (1878-1957): The personality and his achievements. *Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO* 58: 17-30.
- Wagner, R.H., 2012. A critical account of recent records of Devonian megaflora from the Iberian Peninsula, in geological context. *Review of Palaeobotany and Palynology* 171: 95-102.
- Wagner, R.H., 2017. The “global” scheme of Pennsylvanian chronostratigraphic units contrasted with the West European and North American regional classifications: discussion of paleogeographic zones/regions and problems of correlation. *Stratigraphy* 14(1-4): 405-423.
- Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2010. The Carboniferous floras of the Iberian Peninsula: A synthesis with geological connotations. *Review of Palaeobotany and Palynology* 162(3): 239-324.
- Wagner, R.H., e Amerom, H.W.J. van, 1995. Wilhelmus Josephus Jongmans (1878-1957): Paleobotanist, Carboniferous stratigrapher; and floral biogeographer. In: *Historical Perspective of Early Twentieth Century Carboniferous Paleobotany in North America*. Editado por P.C. Lyons, E.D. Morey e R.H. Wagner. Geological Society of America 185: 75-90.
- Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1982a. A middle Westphalian flora from the Alvarelos strip near Serra de Bougado, Santo Tirso, North Portugal. *Comunicações Serviços Geológicos de Portugal* 68(2): 257-266, plates I-VI.
- Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1982b. Systematics and distribution of *Linopteris florini* TEIXEIRA and *Linopteris gangamopteroides* (DE STEFANI) WAGNER. *Comunicações Serviços Geológicos de Portugal* 68(2): 247-256, plates I-IV.
- Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1983a. The Carboniferous megafloras of Portugal – a revision of identifications and discussion of stratigraphic ages. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal 29: 127-152, plates I-XVIII.
- Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1983b. Two rare pectopterids from Westphalian D and Stephanian strata in the Western Iberian Peninsula. In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula*. Editado por M.J. Lemos de Sousa. Porto, Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp.229-240.
- Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1985. *Oligocarpia leptophylla* (Bunbury), Nomenclatorial history and description of the lectotype. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Porto, *Anais Faculdade de Ciências do Porto* 64(1983): 481-490.
- Wagner, R.H., Lemos de Sousa, M.J., e Gomes da Silva, F., 1983. Stratigraphy and fossil flora of the Upper Stephanian C of Buçaco, north of Coimbra (Portugal). In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula*. Editado por M.J. Lemos de Sousa. Porto, Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp.127-156.
- Wagner, R.H., Park, R.K., Winkler Prins, C.F., e Lys, M., 1977. The post-Leonian basin in Palencia: a report on the stratotype of the Cantabrian Stage. In: *Symposium on Carboniferous Stratigraphy*. Editado por S.V. Holub e R.H. Wagner. Geological Survey, Prague, pp.89-146.
- Wagner, R.H., Ribeiro, A., e Lemos de Sousa, M.J., 1984. *Bacia Carbonífera do Douro: Reinterpretação da Geologia do sector Germunde-Choupelo, Recomendações para a investigação geológico-mineira deste sector e de sectores anexos*. Fornelo, 7 de novembro, 17p. +figuras. (Relatório não publicado).
- Wagner, R.H., Ribeiro, A., e Lemos de Sousa, M.J., 1985. *Bacia Carbonífera do Douro: Estado dos conhecimentos; recomendações para o prosseguimento da investigação geológico-mineira*. Fornelo, 25 de outubro, 13p. +figuras. (Relatório não publicado).
- Wagner, R.H., Ribeiro, A., e Lemos de Sousa, M.J., 1987. *Bacia Carbonífera do Douro: Síntese de recomendações para prosseguimento dos trabalhos*. Fornelo, 8 de julho, 7p. (Relatório não publicado).

- Wagner, R.H., Sánchez de Posada, L.C., Martínez Chacón, M.L., Fernández, L.P., Villa, E., e Winkler Prins, C.F., 2002. The Asturian Stage: A preliminary proposal for the definition of a substitute for Westphalian D. In: *Carboniferous and Permian of the World*. Editado por L.V. Hills, C.M. Henderson e E.W. Bamber. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 19: 832-850.
- Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1985. Stratotypes of the two lower Stephanian stages, Cantabrian and Barruelian. *Compte Rendu 10^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Madrid 1983) 4: 473-483.
- Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 2016. History and current status of the Pennsylvanian chronostratigraphic units: problems of definition and interregional correlation. *Newsletters on Stratigraphy* 49(2): 281-320.

ANEXO

Lista completa das publicações de Robert Wagner

Assinalam-se com um asterisco (*) as publicações relativas a estudos específicos sobre Portugal e, com dois asteriscos (**), as publicações de síntese sobre a Península Ibérica que, naturalmente, integram uma componente portuguesa.

1. Wagner, R.H., e Wagner-Gentis, C.H.T., 1952. Aportación al conocimiento de la geología de la zona de Barruelo (Palencia). *Estudios Geológicos* VIII(16): 301-344.
2. Wagner, R.H., 1955. Rasgos estratigráfico-tectónicos del Paleozoico Superior de Barruelo (Palencia). *Estudios Geológicos* XI(26): 145-202.
3. Jongmans, W.J., e Wagner, R.H., 1957. Apuntes para el estudio geológico de la Zona Hullera de Riosa (Cuenca Central de Asturias). *Estudios Geológicos* XIII(33): 7-26.
4. Wagner, R.H., 1957. Nota sobre la estratigrafía del terreno hullero de Sabero (León). *Estudios Geológicos* XIII(35-36): 229-239, láminas XXXI-XXXV.
5. Wagner, R.H., 1958. On *Sphenopteris* (*Sauropteris*?) *dimorpha* (Lesq.) nov. comb. *Palaeontographica*, B, 104(4-6): 105-114.
6. Wagner, R.H., e Breimer, A., 1958. Una flora del Estefaniense inferior en el monte de San Cristóbal (Palencia, España). *Estudios Geológicos* XIV(37): 5-28.
7. Wagner, R.H., 1958. Una nueva especie de *Odontopteris* en el Estefaniense inferior en España. *Estudios Geológicos* XIV(37): 31-41.
8. Wagner, R.H., 1958. On the occurrence of *Callipteris bilharzi* (Frentzen), in the Stephanian of Northern Spain. *Estudios Geológicos* XIV(38): 71-80, láminas VII-VIII.
9. Wagner, R.H., 1958. *Lobopteris alloiopteroides*, una nueva especie de Pecopteridea del Estefaniense A Español. *Estudios Geológicos* XIV(38): 81-106.
10. Wagner, R.H., 1958. *Anastomopteris*, a new plant fossil genus from the Carboniferous of Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey* 51: 32-34.
11. Wagner, R.H., 1959. Une flore permienne d'affinités cathaysiennes et gondwaniennes en Anatolie sud-oriental. *Comptes rendus Académie des Sciences de l'Académie des Sciences* 248: 1379-1381.
12. Wagner, R.H., 1959. Some Stephanian Pecopterids from NW Spain. *Mededelingen Geologische Stichting*, (N.S.), 12 (for 1958): 5-23, plates 1-13.
13. Wagner, R.H., 1959. *Pecopteris pseudobucklandi* ANDRAE and its general affinities. *Mededelingen Geologische Stichting*, (N.S.), 12(for 1958): 25-30, plates 14-16.
14. Wagner, R.H., 1959. Flora fósil y estratigrafía del Carbonífero de España NW y Portugal N. *Estudios Geológicos* XV: 393-420. (Volume de homenagem a M. San Miguel de la Cámara).
15. Wagner, R.H., 1959. Sur la présence d'une nouvelle phase tectonique "léonienne" d'âge Westphalien D dans le Nord Ouest de l'Espagne. *Comptes rendus Académie des Sciences* 249: 2804-2806.
16. Wagner, R.H., 1960. Middle Westphalian floras from northern Palencia, Spain. *Estudios Geológicos* XVI(2): 55-92.
17. Wagner, R.H., 1961. Some Alethopterideae from the South Limburg Coalfield. *Mededelingen Geologische Stichting*, (N.S.), 14: 5-10, plates 1-8.
18. Wagner, R.H., 1962. On a mixed Cathaysia and Gondwana flora from SE Anatolia (Turkey). *Compte Rendu 4^e Congrès Carbonifère* (Heerlen 1958) III: 745-752.
19. Wagner, R.H., 1962. A brief review of the stratigraphy and floral succession of the Carboniferous in NW Spain. *Compte Rendu 4^e Congrès Carbonifère* (Heerlen 1958) III: 753-762, plates 29-33.

20. Wagner, R.H., 1962. Sur le terrain houiller de Ciñera-Matallana (León, Espagne). *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 254: 2393-2395.
21. Wagner, R.H., 1962. La signification de la phase léonienne dans le Nord Ouest de l'Espagne. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 254: 3382-3384.
22. Wagner, R.H., 1962. Discordancia bretónica en el NE de Palencia (España). *Notas y Comunicaciones Instituto Geológico y Minero de España* 67: 17-24.
23. Wagner, R.H., 1962. An Upper Westphalian flora from the Mine Inés, near the Pass of Pajares, on the Leonese-Asturian boundary (NW Spain). *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España* 68: 238-249, plates 1-5.
24. Wagner, R.H., e Wagner-Gentis, C.H.T., 1963. Summary of the Stratigraphy of Upper Palaeozoic Rocks in NE Palencia, Spain. *Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, (B), LXVI(3): 149-163.
25. Wagner, R.H., 1963. A general account of the Palaeozoic Rocks between the Rivers Porma and Bernesga (León, NW Spain). *Boletín Instituto Geológico y Minero de España* 74: 171-331.
26. Wagner, R.H., 1963. Sur les *Callipteridium* du Westphalien supérieur et du Stéphanien. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 257: 719-721.
27. Wagner, R.H., 1963. Stephanian B flora from the Ciñera-Matallana Coalfield (León) and neighbouring outliers. I: Introduction, *Neuropteris*. *Notas y Comunicaciones Instituto Geológico y Minero de España* 72: 5-70, plates 1-9.
28. Wagner, R.H., 1963. Sur le géosynclinal cantabro-asturien. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 257: 3008-3010.
29. Wagner, R.H., 1964. Stephanian B flora from the Ciñera-Matallana Coalfield (León), and neighbouring outliers. II: *Mixoneura*, *Reticulopteris*, *Linopteris* and *Odontopteris*. *Notas y Comunicaciones Instituto Geológico y Minero de España* 75: 5-56, plates 10-19.
30. Higgins, A.C., Wagner-Gentis, C.H.T., e Wagner, R.H., 1964. Basal Carboniferous Strata in Part of Northern León, NW Spain: Stratigraphy, Conodont and Goniatite Faunas. *Bulletin Société Belge de Géologie, Paléontologie et Hydrologie* LXXII(2): 205-248, pls I-V. (Tradução espanhola: Estratos basales del Carbonífero en el norte de León. Estratigrafía y faunas de conodontes y goniatites. *Notas y Comunicaciones Instituto Geológico y Minero de España* 79: 5-43, láminas I-V).
31. Wagner, R.H., 1964. Stephanian Floras in NW Spain, with special reference to the Westphalian D-Stephanian A boundary. *Compte Rendu 5^e Congrès Carbonifère* (Paris 1963) II: 835-851, plates 1-3.
32. Wagner, R.H., 1964. Ideas sobre el significado tectónico y paleogeográfico del arco astúrico en el noroeste de España. *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural* 62: 343-346. (Geología).
33. Wagner, R.H., 1965. Stephanian B flora from the Ciñera-Matallana Coalfield (León) and neighbouring outliers. III: *Callipteridium* and *Alethopteris*. *Notas y Comunicaciones Instituto Geológico y Minero de España* 78: 5-70, plates 20-27.
34. Wagner, R.H., 1965. Palaeobotanical dating of Upper Carboniferous folding phases in NW Spain. *Memorias Instituto Geológico y Minero de España* 66: 1-169.
35. Wagner, R.H., 1966. On the presence of probable Upper Stephanian beds in Ayrshire, Scotland. *Scottish Journal of Geology* 2(1): 122-123.
36. Wagner, R.H., 1966. Sur l'existence, dans la Cordillère Cantabrique, de séries de passage entre Westphalien et Stéphanien: la limite inférieure de ces formations "cantabriques". *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 262(Serie D): 1337-1340.
37. Wagner, R.H., 1966. La succession des séries cantabriques et leur limite supérieure. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 262(Serie D): 1419-1422.

38. Colchen, M., e Wagner, R.H., 1966. Précisions sur les flores carbonifères de la Sierra de la Demanda (province de Burgos), Espagne. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 262(Serie D): 2435-2438.
39. Wagner, R.H., 1966. El significado de la flora en la Estratigrafía del Carbonífero superior. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Geol.)* 64: 203-208.
40. Wagner, R.H., 1966. Notes on the Geology of the Palaeozoic Rocks in the northeastern part of the Province of Palencia, NW Spain. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España* 86: 31-40.
41. Wagner, R.H., e Utting, J., 1967. Sur le terrain houiller de Puertollano (Province de Ciudad Real, Espagne). *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 264(Serie D): 5-8.
42. Wagner, R.H., 1967. Two new family names in the Class Pteridospermopsida. *Proceedings of the Geological Society of London* 1640: 150-151.
43. Wagner, R.H., 1967. A description of *Alethopteris moravica* Augusta from the Rosice-Oslavany coalfield in Czechoslovakia. *Mededelingen Geologische Stichting, (N.S.)*, 18: 53-55.
44. Wagner, R.H., e Alvarez Ramis, C., 1967. *Mariopteris* from the Stephanian of north-west Spain. *Palaeontology* 10(4): 694-705, plates 104-105.
45. Alvin, K.L., Barnard, P.D.W., Harris, T.M., Hughes, N.F., Wagner, R.H., e Wesley, A., 1967. Chapter 6: Gymnospermophyta. In: *The Fossil Record*. Editado por W.B. Harland, G.H. Holland, M.R. House, N.F. Hughes, A.B. Reynolds, M.J.S. Rudwick, G.E. Satterthwaite, L.B.H. Tarlo, e E.C. Willey. Symposium Geological Society of London, pp.247-252.
46. Wagner, R.H., 1967. Apuntes sobre las floras de la zona de Gamonedo-Cabrales en la parte oriental de Asturias. Faculdade de Ciências, Universidad de Oviedo. *Trabajos de Geología* 1: 47-58, láminas I-III.
47. Wagner, R.H., 1968. Upper Westphalian and Stephanian species of *Alethopteris* from Europe, Asia Minor and North America. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst (C)*, III-1(6): 1-188, plates 1-64. (Tese de Doutoramento).
48. Wagner, R.H., 1968. El estado actual de las investigaciones sobre estratotipos del Carbonífero superior de Europa occidental. Universidad de Madrid, Facultad de Ciências. *Publicaciones del Departamento de Paleontología* 6(Serie B): 1-9. (Resumo de Colóquios de Paleontología, 13: 3-4).
49. Cuerda, A.J., Wagner, R.H., e Arrondo, O.G., 1968. Observaciones sobre algunas floras del Carbonífero argentino. *Ameghiniana* V (7): 265-269.
50. Germer, R., Kneuper, G., e Wagner, R.H., 1968. Zur Westfal/Stefan-Grenze und zur Frage der asturischen Faltungsphase im Saarbrücker Hauptsattel. *Geologica et Palaeontologica* 2: 59-71.
51. Wagner, R.H., Villegas, F.J., e Fonollá, F., 1969. Description of the Lower Cantabrian stratotype near Tejerina (León, NW Spain). *Compte Rendu 6^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Sheffield 1967) I: 115-138, plates 1-5.
52. Wagner, R.H., 1969. Proposal for the recognition of a new "Cantabrian" Stage at the base of the Stephanian Series. *Compte Rendu 6^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Sheffield 1967) I: 139-150.
53. George, T.N., e Wagner, R.H., 1969. Report of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on Carboniferous Stratigraphy. *Compte Rendu 6^e Congrès Carbonifère* (Sheffield 1967) I: xlii-xlv.
54. Wagner, R.H., e Artieda, J.L., 1970. *La cuenca minera Ciñera-Matallana*. Sociedad Anónima Hullera Vasco-Leonesa, 289p.
55. George, T.N., e Wagner, R.H., 1970. Report and Proceedings of the Meeting of the IUGS Subcommission on Carboniferous Stratigraphy held in Liège. In: *Colloque sur la Stratigraphie du Carbonifère*. Editado por M. Streel e R.H. Wagner. Congrès et Colloques de l'Université de Liège 55: 151-165.
56. Bouroz, A., Gras, H., e Wagner, R.H., 1970. À propos de la limite Westphalien-Stephanien et du Stéphanien inférieur. In: *Colloque sur la Stratigraphie du Carbonifère*. Editado por M. Streel e R.H. Wagner. Congrès et Colloques de l'Université de Liège 55: 205-225.

-
57. Wagner, R.H., 1970. An Outline of the Carboniferous Stratigraphy of Northwest Spain. In: *Colloque sur la Stratigraphie du Carbonifère*. Editado por M. Streel e R.H. Wagner. Congrès et Colloques de l'Université de Liège 55: 429-463.
 58. Wagner, R.H., Jones, D.G., Spinner, E., e Wagner-Gentis, C.H.T., 1970. The upper Cantabrian rocks near Inganzo, eastern Asturias, Spain. In: *Colloque sur la Stratigraphie du Carbonifère*. Editado por M. Streel e R.H. Wagner. Congrès et Colloques de l'Université de Liège 55: 465-486, plates 30-33.
 59. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1970. The stratigraphic succession, flora and fauna of Cantabrian and Stephanian A rocks at Barruelo (prov. Palencia), NW Spain. In: *Colloque sur la Stratigraphie du Carbonifère*. Editado por M. Streel e R.H. Wagner. Congrès et Colloques de l'Université de Liège 55: 487-551, plates 34-38.
 60. Wagner, R.H., 1971. The Carboniferous of Spain: its Palaeogeographical significance. *Compte Rendu 6^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Sheffield 1967) IV: 1591-1592.
 61. Wagner, R.H., García-Loygorri, A., e Knight, J.A., 1971. Account of the International Field Meeting on the Carboniferous of the Cordillera Cantábrica, 19-26 Sept. 1970. *Trabajos de Geología* 3(3): 1-41, plates 1-5.
 62. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1971. Description of rhythmic units in Upper Moscovian (Westphalian C) rocks exposed along the road of La Nueva (Asturias). In: *Note on the cyclic sedimentation in the Central Carboniferous Basin of Asturias*. Editado por M.J.M. Bless. *Trabajos de Geología* 3(3): 49-52.
 63. Wagner, R.H., 1971. Palaeontological Note: Drifted plant remains. In: *The stratigraphy of the Westphalian C around Prioro (prov. León, Spain)*. Editado por A.J. van Loon. *Trabajos de Geología* 3(3): 257-263, plates 7-8.
 64. Martínez-García, E., e Wagner, R.H., 1971. Marine and continental deposits of Stephanian Age in Eastern Asturias (NW Spain). *Trabajos de Geología* 3(3): 285-307, plates 1-5.
 65. Moore, L.R., Neves, R., Wagner, R.H., e Wagner-Gentis, C.H.T., 1971. The stratigraphy of Namurian and Westphalian rocks in the Villamanín area of northern León, NW Spain. *Trabajos de Geología* 3(3): 307-363, plates 1-8.
 66. Wagner, R.H., 1971. The stratigraphy and structure of the Ciñera-Matallana Coalfield (prov. León, NW Spain). *Trabajos de Geología* 4(4): 385-431, figuras 1-24.
 67. Wagner, R.H., 1971. Carboniferous nappe structures in north-eastern Palencia (Spain). *Trabajos de Geología* 4(4): 431-461, plates 1-7.
 68. Wagner, R.H., 1971. The Westphalian D floras of the Olloniego and Esperanza formations in the Central Asturian Coalfield. *Trabajos de Geología* 4(4): 461-507, plates 1-17.
 69. Wagner, R.H., e Fernández-García, L., 1971. The lower Carboniferous and Namurian rocks north of La Robla (León). *Trabajos de Geología* 4(4): 507-533.
 70. Wagner, R.H., e Varker, W.J., 1971. The distribution and development of post-Leonian strata (upper Westphalian D, Cantabrian, Stephanian A) in northern Palencia, Spain. *Trabajos de Geología* 4(4): 533-603.
 71. Wagner, R.H., Winkler Prins, C.F., e Riding, R.E., 1971. Lithostratigraphic units of the lower part of the Carboniferous in northern León, Spain (with a "Note on some Goniatite faunas" by C.H. Wagner-Gentis). *Trabajos de Geología* 4(4): 603-663, plates 1-3.
 72. Bouroz, A., e Wagner, R.H., 1972. Sur la valeur stratigraphique relative des macroflores du Carbonifère. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 274(Serie D): 34-37.
 73. Wagner, R.H., e Spinner, E., 1972. The stratigraphic implications of the Westphalian D, macro- and microflora of the Forest of Dean Coalfield, (Gloucestershire), England. *International Geological Congress Report, 24th Sesion, (Montreal) 7(7)*: 428-437.
 74. George, T.N., e Wagner, R.H., 1972. International Union of Geological Sciences, Subcommission on Carboniferous Stratigraphy. Proceedings and Report of the General Assembly at Krefeld, August 21-22. *Compte Rendu 7^e Congrès International the Stratigraphie et de Géologie Carbonifère* (Krefeld 1971) I: 139-147.

75. Bouroz, A., Knight, J.A., Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1972. Sur la limite Westphalien-Stéphanien et sur les subdivisions du Stéphanien inférieur *sensu lato*. *Compte Rendu 7^e Congrès International the Stratigraphie et de Géologie Carbonifère* (Krefeld 1971) I: 263-268. (Relatório do grupo de trabalho sobre o Estefaniano).
76. Wagner, R.H., 1972. The Cantabrian Stage in its stratigraphic and palaeogeographic context. *Compte Rendu 7^e Congrès International the Stratigraphie et de Géologie Carbonifère* (Krefeld 1971) I: 263-268.
77. Wagner, R.H., e Martínez-García, E., 1974. The relation between geosynclinal folding phases and foreland movements in Northwest Spain. *Studia Geologica* (Salamanca) VII: 131-158, figuras 1-17.
78. Wagner, R.H., 1976. The chronostratigraphic units of the Upper Carboniferous in Europe. *Bulletin Société Belge de Géologie* 83(3-4): 235-253.
79. Wagner, R.H., e Spinner, E., 1976. *Bodeodendron*, tronco associado à *Sporangioistrobus*. *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 282(Serie D): 353-356.
80. Wagner, R.H., Park, R.K., Winkler Prins, C.F., e Lys, M., 1977. The post-Leonian basin in Palencia: a report on the stratotype of the Cantabrian Stage. In: *Symposium on Carboniferous Stratigraphy*. Editado por S.V. Holub e R.H. Wagner. Geological Survey, Prague, pp.89-146.
81. Wagner, R.H., 1977. Comments on the Upper Westphalian and Stephanian floras of Czechoslovakia, with particular reference to their Stratigraphic age. In: *Symposium on Carboniferous Stratigraphy*. Editado por S.V. Holub e R.H. Wagner. Geological Survey, Prague, pp.441-457.
82. Dvořák, J., Mirouse, R., Paproth, E., Pelhâte, A., Ramsbottom, W.H.C., e Wagner, R.H., 1977. Relations entre la sédimentation éodévono-carbonifère et la tectonique varisque en Europe Centrale et Occidentale. In: *La chaîne varisque d'Europe central et occidentale*. Editado por Centre National de la Recherche Scientifique. Colloque International du Centre National de la Recherche Scientifique (Rennes 1974) 243: 241-273.
83. Wagner, R.H., 1978. The Valdeinfierno sequence (prov. Córdoba): its tectonic, sedimentary and floral significance. *Annales Société géologique du Nord* XCVIII: 59-66, plate IV.
84. Bouroz, A., Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1978. Report and Proceedings of IUGS Subcommission on Carboniferous Stratigraphy Meeting in Moscow, 8-12 Sept. 1975. *Compte Rendu 8^e Congrès International the Stratigraphie et de Géologie Carbonifère* (Moscow 1975) 1: 27-35.
85. Bouroz, A., Einor, O.L., Gordon, M., Meyen, S.V., e Wagner, R.H., 1978. Proposal for an International Chronostratigraphic Classification of the Carboniferous. *Compte Rendu 8^e Congrès International the Stratigraphie et de Géologie Carbonifère* (Moscow 1975) 1: 36-39. (Também publicado em Doklady Akademia Nauk SSSR e Société Industrie Minérale, em russo e francês, respetivamente).
86. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1979. The lower Stephanian of western Europe. *Compte Rendu 8^e Congrès International the Stratigraphie et de Géologie Carbonifère* (Moscow 1975) 3: 111-140.
87. Wagner, R.H., 1978. Two little known species of *Sphenophyllum* from the Stephanian of Spain and France. *Palaeobotanist* (1976) 25: 565-581.
88. Archangelsky, S., Azcuy, C.L., e Wagner, R.H., 1978. Nuevas Licópsidas gondwánicas fructificadas: su significado e importancia. *Acta Geológica Lilloana* 14: 81-83.
89. Wagner, R.H., e Higgins, A.C., 1979. The Carboniferous of the USSR: its stratigraphic significance and outstanding problems of world-wide correlation. In: *The Carboniferous of the USSR*. Editado por R.H. Wagner, A.C. Higgins e S. Meyen. Occasional Publications Yorkshire geological Society 4: 5-22.
90. Odreman, O., e Wagner, R.H., 1979. Precisiones sobre algunas floras carboníferas y pérmicas de los Andes venezolanos. *Boletín de Geología* (Venezuela) 13(25): 77-79.
91. Wagner, R.H., 1980. Consideraciones sobre el límite Carbónico-Pérmico. In: *Actas II Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía y I Congreso Latinoamericano de Paleontología* (Buenos Aires, 1978) IV: 177-188.

92. Wagner, R.H., 1980. Breve reseña de la labor cumplida por la Subcomisión Internacional sobre la Estratigrafía del Carbonífero (IUGS). In: *Actas II Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía y I Congreso Latinoamericano de Paleontología* (Buenos Aires, 1978) IV: 237-244.
93. Archangelsky, S., Azcuy, C.L., Pinto, I.D., González, C.R., Marques Toigo, M., Rösler, O., e Wagner, R.H., 1980. The Carboniferous and Early Permian of the South American Gondwana area: a summary of biostratigraphic information. In: *Actas II Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía y I Congreso Latinoamericano de Paleontología* (Buenos Aires, 1978) IV: 257-269.
94. Archangelsky, S., Azcuy, C.L., e Wagner, R.H., 1981. Three dwarf lycophytes from the Carboniferous of Argentina. *Scripta Geologica* 64: 1-35, figuras 1-15.
95. Wagner, R.H., 1982. Floral changes near the Mississippian-Pennsylvanian boundary: an appraisal. In: *Biostratigraphic data for a mid-Carboniferous boundary*. Editado por W.H. Ramsbottom, W.B. Saunders and B. Owens. Subcommission on Carboniferous Stratigraphy, Leeds, England, pp.120-127.
96. Wagner, R.H., Soper, N.J., e Higgins, A.K., 1982. A Late Permian flora of Pechora affinity in North Greenland. In: *Palaeontology of Greenland: short contributions*. Editado por J.S. Peel. Grønlands Geologiska Undersøgelse Rapport 108: 5-13.
97. Martínez García, E., e Wagner, R.H., 1982. Una cuenca marina del Estefaniense superior en el noroeste de España. *Trabajos de Geología* 12(12): 119-125.
98. Wagner, R.H., e Martínez García, E., 1982. Description of an early Permian flora from Asturias and comments on similar occurrences in the Iberian Peninsula. *Trabajos de Geología* 12(12): 273-287.
99. * Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1982. Systematics and distribution of *Linopteris florini* TEIXEIRA and *Linopteris gangamopteroides* (DE STEFANI) WAGNER. *Comunicações Serviços Geológicos de Portugal* 68(2): 247-256, plates I-IV.
100. * Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1982. A middle Westphalian flora from the Alvarelos strip near Serra de Bougado, Santo Tirso, North Portugal. *Comunicações Serviços Geológicos de Portugal* 68(2): 257-266, plates I-VI.
101. Wagner, R.H., 1983. A lower Rotliegend Flora from Ayrshire. *Scottish Journal of Geology* 19(2): 135-155.
102. Martínez García, E., Wagner, R.H., Lobato, L., Fernández, L., e Alonso, J.L., 1983. El Carbonífero de la región oriental (Pisuerga-Carrión). In: *Carbonífero y Pérmico de España*. Editado por C. Martínez Díaz. Instituto Geológico Minero de España, pp.116-132.
103. Wagner, R.H., Martínez García, E., Winkler Prins, C.F., e Lobato, L., 1983. *Field Trip A: Carboniferous Stratigraphy of the Cantabrian Mountains*. X Congrès International de Stratigraphie et Géologie du Carbonifère (Madrid 1983), 212p.
104. * Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1983. General description of the terrestrial Carboniferous basins in Portugal and history of investigations. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal 29: 117-126.
105. * Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1983. The Carboniferous megaflores of Portugal – a revision of identifications and discussion of stratigraphic ages. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal 29: 127-152, plates I-XVIII.
106. * Wagner, R.H., 1983. The palaeogeographical and age relationships of the Portuguese Carboniferous floras with those of other parts of the Western Iberian Peninsula. In: *The Carboniferous of Portugal*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e J.T. Oliveira. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal 29: 153-177.
107. Archangelsky, S., e Wagner, R.H., 1983. *Glossopteris anatolica* sp. nov. from uppermost Permian strata in south-east Turkey. *Bulletin British Museum Natural History (Geology)* 37(3): 81-91, figuras 1-14.
108. Wagner, R.H., e Bowman, M.B.J., 1983. The position of the Bashkirian/Moscovian boundary in West European chronostratigraphy. *Newsletters on Stratigraphy* 12(3): 132-161.

109. Wagner, R.H., e Fernández García, L., 1983. Upper Westphalian D and Cantabrian strata in the Guardo Coalfield: Tectonics, Sedimentation, Stratigraphy. In: *Geology and Palaeontology of the Guardo Coalfield (NE León - NW Palencia), Cantabrian Mts.* Editado por R.H. Wagner, L. Fernández García e R.M.C. Eagar. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 11-55. (Serie Informes).
110. Wagner, R.H., 1983. Late Westphalian D and early Cantabrian floras of the Guardo Coalfield. In: *Geology and Palaeontology of the Guardo Coalfield (NE León - NW Palencia), Cantabrian Mts.* Editado por R.H. Wagner, L. Fernández García e R.M.C. Eagar. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 57-91, plates 1-48. (Serie Informes).
111. Wagner, R.H., 1983. *Neuropteris guadiatensis*, a new species from the Westphalian B of the Peñarroya-Belmez Coalfield in the province of Córdoba, S.W. Spain. In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 93-99.
112. Wagner, R.H., Coquel, R., e Broutin, J., 1983. Mississippian floras of the Sierra Morena, S.W. Spain: A progress report. In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 101-126.
113. ★ Wagner, R.H., Lemos de Sousa, M.J., e Gomes da Silva, F., 1983. Stratigraphy and fossil flora of the Upper Stephanian C of Buçaco, north of Coimbra (Portugal). In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 127-156.
114. ★ Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1983. Precisões sobre a flora fóssil do Couto Mineiro do Pejão e da mina Paradaça N.º 1 (Bacia Carbonífera do Douro). In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 157-170.
115. Andreis, R.R., e Wagner, R.H., 1983. Estudio de abanicos aluviales en el borde norte de la Cuenca Westfaliense B de Peñarroya-Belmez (Córdoba). In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 171-227, láminas 1-5.
116. ★ Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1983. Two rare Pecopterids from Westphalian D and Stephanian strata in the Western Iberian Peninsula. In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 229-240, plates 1-6.
117. Wagner, R.H., Coquel, R., e Broutin, J., 1983. Micro and megafloral remains of Early Westphalian age from Villanueva del Río y Minas (Province of Sevilla, Spain). In: *Contributions to the Carboniferous Geology and Palaeontology of the Iberian Peninsula.* Editado por M.J. Lemos de Sousa. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Mineralogia e Geologia, pp. 241-251, plates 1-2.
118. Wagner, R.H., Redondo, E., e Jurado, J., 1984. Actualidad de la investigación geológico-minera en la cuenca carbonífera del Guadiato (Córdoba). *VII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia* (Barcelona) 1: 221-238.
119. Wagner, R.H., 1984. Megafloral Zones of the Carboniferous. In: *Compte Rendu 9^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère.* Editado por P.K. Sutherland e W.L. Manger. Illinois, 2: 109-134.
120. Wagner, R.H., Carballeira, J., Ambrose, T., Martínez García, E., e López Rico, J., 1984. *Mapa Geológico de España.* Escala 1:50.000. Barruelo de Santullán: Instituto Geológico y Minero de España. Memoria, 112p.
121. Wagner, R.H., 1985. *Pecopteris hispanica* sp. nov., an Upper Stephanian fern from the Ciñera - Matallana Coalfield, NW Spain. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology).* Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 1-4, plates 1-3. (Suplemento ao volume 1983).

122. Wagner, R.H., 1985. Upper Stephanian stratigraphy and palaeontology of the Puertollano Basin, Ciudad Real, Spain. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 171-231. (Suplemento ao volume 1983).
123. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1985. The Cantabrian and Barruelian stratotypes: a summary of basin development and biostratigraphic information. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 359-410. (Suplemento ao volume 1983).
124. ★ Lemos de Sousa, M.J., e Wagner, R.H., 1985. Annotated catalogue of the Bernardino Antonio Gomes Fossil Plant Collection in Lisbon. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 411-434. (Suplemento ao volume 1983).
125. Wagner, R.H., e Talens, J., 1985. On the upper Westphalian and Stephanian species, *Lepidodendron dissitum* Sauveur. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 435-444. (Suplemento ao volume 1983).
126. Wagner, R.H., Talens, J., e Meléndez, B., 1985. Upper Stephanian stratigraphy and megafloora of Henarejos (Province of Cuenca) in the Cordillera Ibérica, Central Spain. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 445-480. (Suplemento ao volume 1983).
127. ★ Wagner, R.H., e Lemos de Sousa, M.J., 1985. *Oligocarpia leptophylla* (Bunbury), Nomenclatorial history and description of the lectotype. In: *Papers on the Carboniferous of the Iberian Peninsula (Sedimentology, Stratigraphy, Palaeontology, Tectonics, and Geochronology)*. Editado por M.J. Lemos de Sousa e R.H. Wagner. Anais da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto 64: 481-490. (Suplemento ao volume 1983).
128. Wagner, R.H., e Fernández-García, L.G., 1985. Late Westphalian D and Cantabrian Strata in the Guardo Coalfield (NW Spain): Tectonics, Sedimentation, Stratigraphy. *Compte Rendu 9^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Washington e Champaign-Urbana) 3: 345-366.
129. Martínez-García, E., e Wagner, R.H., 1985. The Post-Asturian Marine Basin of Late Stephanian Age in Northwest Spain. *Compte Rendu 9^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Washington e Champaign-Urbana) 3: 508-516.
130. Wagner, R.H., Saunders, W.B., e Manger, W.L., 1985. Report of the International Union of Geological Sciences – Subcommission on Carboniferous Stratigraphy (Assembleia Geral em Madrid, setembro 1983). *Compte Rendu 10^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Madrid 1983) 1: lvii-lxi.
131. Wagner, R.H., Talens, J., e Meléndez, B., 1985. Macroflora del Carbonífero superior de Henarejos (Provincia de Cuenca, Cordillera Ibérica). *Compte Rendu 10^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Madrid 1983) 2: 387-393, 1 lámina.
132. El-Khayal, A.A., e Wagner, R.H., 1985. Upper Permian stratigraphy and megaflooras of Saudi Arabia: Palaeogeographic and climatic implications. *Compte Rendu 10^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Madrid 1983) 3: 17-26.
133. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1985. Stratotypes of the two lower Stephanian stages, Cantabrian and Barruelian. *Compte Rendu 10^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Madrid 1983) 4: 473-483.

134. Hill, C.R., Wagner, R.H., e El Khayal, A.A., 1985. *Qasimia* gen. nov., an early Marattia-like fern from the Permian of Saudi Arabia. *Scripta Geologica* 79: 1-50, plates 1-19.
135. Wagner, R.H., Hill, C.R., e El-Khayal, A.A., 1985. *Gemellithea* gen. nov., a fertile pectopterid fern from the Upper Permian of the Middle East. *Scripta Geologica* 79: 51-74, plates 1-9.
136. Kerey, I.E., Kelling, G., e Wagner, R.H., 1986. An outline stratigraphy and palaeobotanical records from the Middle Carboniferous rocks of northwestern Turkey. *Annales Société Géologique du Nord* CV: 203-216, plates VII-XI.
137. Wagner, R.H., 1986. *La Paleobotánica Hullera, sus aspectos botánicos, estratigráficos y paleogeográficos, floras neopaleozoicas del SW de España*. Universidad de Córdoba, Cerimónia de Investidura do grau de Doutor *Honoris Causa*, dezembro 1985, 137p.
138. Wagner, R.H., e Jurado, J., 1988. Geología de la cuenca carbonífera de Peñarroya y exploración de antracitas escondidas en un lentejón tectónico. *VIII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia* (Oviedo) 6: 225-241.
139. Wagner, R.H., 1989. A late Stephanian forest swamp with *Sporangiostrobus* fossilized by volcanic ash fall in the Puertollano Basin, central Spain. *International Journal of Coal Geology* 12(1-4): 523-552.
140. Diéguez, M.C., Talens, J., e Wagner, R.H., 1989. Paleobotánica. In: *Paleontología*. Editado por E. Aguirre. Nuevas Tendencias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp.317-339.
141. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 1989. *Guía de Paleobotánica*. Publicação do Jardim Botânico de Córdoba, 39p.
142. Martínez García, E., Wagner, R.H., e García-Ramos, J.C., 1991. La cobertera paleozoica posthercínica en el Oriente de Asturias. *Geogaceta* 10: 160-162.
143. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 1991. Floral characterisation and biozones of the Westphalian D Stage in NW Spain. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie (Abhandlungen)* 183 (1): 171-202.
144. Brousmiche, C., Coquel, R., e Wagner, R.H., 1992. Les *Scoleopteris* du Stéphanien supérieur du Bassin de Puertollano (Espagne). *Geobios* 25(3): 323-339.
145. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1992. Major subdivisions of the Carboniferous System. *Compte Rendu 11^e Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Beijing 1987) 1: 213-245.
146. Wagner, R.H., 1993. Climatic significance of the major chronostratigraphic units of the Upper Palaeozoic. *Compte Rendu 12^e Congrès International Carbonifère et Permien* (Buenos Aires 1991) 1: 83-108.
147. Cúneo, R., Archangelsky, S., e Wagner, R.H., 1993. Lower Permian sphenophylls from Chubut, Argentina. *Ameghiniana* 30(3): 225-243.
148. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1994. General Overview of Carboniferous Stratigraphy. *Annales de la Société géologique de Belgique* 116(1): 163-174.
149. Wagner, R.H., 1994. Puertollano, retazo de una cuenca hullera post-hercínica de finales del Estefaniense. In: *X Jornadas de Paleontología*. Editado por Fernández López. Sociedad Española de Paleontología, 204-212pp.
150. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 1995. Upper Namurian/lower Westphalian of La Camocha, Asturias: Review of floral and faunal data. *Coloquios de Paleontología, Universidad Complutense de Madrid* 47: 151-176. (Volume de homenagem ao Prof. B. Meléndez).
151. Talens, J., e Wagner, R.H., 1995. Stratigraphic implications of late Carboniferous and early Permian megafloras in Lérida, south-central Pyrenees; Comparison with the Cantabrian Mountains. *Coloquios de Paleontología, Universidad Complutense de Madrid* 47: 177-192. (Volume de homenagem ao Prof. B. Meléndez).
152. Brousmiche, C., Coquel, R., e Wagner, R.H., 1995. Nouvelle interprétation du genre *Omphalophloios* White, 1898 (Lycophyte primitive). *Comptes rendus Académie des Sciences* (Paris) 321(IIa): 179-184.
153. Wagner, R.H., e Amerom, H.W.J. van, 1995. Wilhelmus Josephus Jongmans (1878-1957): Paleobotanist, Carboniferous stratigrapher; and floral biogeographer. In: *Historical Perspective of Early Twentieth Century Carboniferous Paleobotany in North America*. Editado por P.C. Lyons, E.D. Morey e R.H. Wagner. Geological Society of America 185: 75-90.

154. Lyons, P.C., e Wagner, R.H., 1995. The Stephanian of North America: Early 1900s controversies and problems. In: *Historical Perspective of Early Twentieth Century Carboniferous Paleobotany in North America*. Editado por P.C. Lyons, E.D. Morey e R.H. Wagner. Geological Society of America 185: 293-314.
155. Wagner, R.H., e Lyons, P.C., 1997. A critical analysis of the higher Pennsylvanian megafloras of the Appalachian region. *Review of Palaeobotany and Palynology* 95(1-4): 255-283. (Bell Symposium volume).
156. Wagner, R.H., 1997. Wilhelmus Josephus Jongmans (1878-1957): The personality and his achievements. *Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO* 58: 17-30.
157. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1997. Carboniferous chronostratigraphy: quo vadis? In: *Proceedings of the XIII International Congress on the Carboniferous and Permian*. Editado por S. Podemski, S. Dy-bova-Jachowicz, J. Jureczka e R.H. Wagner. Kraków 1995, Instytutu Geologicznego CLVII: 187-196.
158. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1997. Estratigrafía y metamorfismo del Carbonífero de la zona de San Martín-Ventanilla (Norte de Palencia, Cordillera Cantábrica): Comentarios críticos. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 10 (1-2): 197-199.
159. Wagner, R.H., 1997. Floral palaeoecology of the Carboniferous/Permian. In: *Registros fósiles e historia de la Tierra*. Editado por E. Aguirre, J. Morales e D. Soria. Curso de Verão, Editorial Complutense, pp. 143-172.
160. Wagner, R.H., e Martínez-García, E., 1998. Floral remains from the highest Valdeón Formation, a marine Stephanian unit south of the Picos de Europa, and comparisons with eastern Asturias. *Revista Española de Paleontología* 13(1): 93-106.
161. Wagner, R.H., e Castro, M.P., 1998. *Neuropteris obtusa*, a rare but widespread late Carboniferous pteridosperm. *Palaeontology* 41(1): 1-22.
162. Wagner, R.H., 1998. Consideraciones sobre los pisos de la Serie Estefaniense. *Monografías de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza* 13: 9-19.
163. Wagner, R.H., 1999. Macrofloras del Carbonífero/Pérmico. In: *La Huella del Pasado. Fósiles de Castilla-La Mancha*. Editado por E. Aguirre e I. Rábano. Patrimonio histórico, Arqueología Castilla-La Mancha, Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Toledo, pp. 77-98.
164. Wagner, R.H., 1999. Peñarroya, a strike-slip controlled basin of early Westphalian age in Southwest Spain. In: *Vestník Českého geologického ústavu* (Bulletin of the Czech Geological Survey) 74 (2): 3-23.
165. Wagner, R.H., 1999. El Alto Guadiato. In: *Patrimonio Geológico de Andalucía*. Editado por J.J. Durán e R. Nuche. ENRESA, Madrid, pp. 122-127.
166. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 1999. Carboniferous stratigraphy of the Sierra del Brezo in northern Palencia: evidence of major uplifts. *Trabajos de Geología* 21: 385-403.
167. Wagner, R.H., e Montero, A., 2000. Palaeobotanical Museum in the Botanical Garden of Córdoba, Spain. In: *10^{ème} Colloque de l'Organisation Française de Paléobotanique, Zaragoza 1999*. Monografías de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza 16: 11-16.
168. Wagner, R.H., 2001. The extrabasinal elements in Lower Pennsylvanian floras of the Maritime Provinces, Canada: Description of *Adiantites*, *Pseudadiantites* and *Rhacopteridium*. *Revista Española de Paleontología* 16(2): 187-207.
169. Wagner, R.H., 2001. *Fósiles vegetales*. Departamento de Medio Ambiente y Protección Civil, Diputación de Córdoba. Serie Recursos Naturales, n.º 6, 105p.
170. Wagner, R.H., Diez, J.B., e Calvo, R., 2001. El Bosque Carbonífero de Verdeña; Vida y muerte de una comunidad florística. In: *Patrimonio Geológico de Castilla y León*. Editado por R. Nuche. ENRESA, Madrid, pp. 380-393.
171. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 2002. Tectonics vs cyclothems: Carboniferous sedimentation in the Cantabrian Mountains, Spain. In: *Carboniferous and Permian of the World*. Editado por L.V. Hills, C.M. Henderson e E.W. Bamber. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 19: 228-238.

-
172. Wagner, R.H., Lausberg, S., e Naugolnykh, S., 2002. The Permian Angara flora from North Greenland: a progress report. In: *Carboniferous and Permian of the World*. Editado por L.V. Hills, C.M. Henderson e E.W. Bamber. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 19: 382-392, plates 1-3.
173. Wagner, R.H., Sánchez de Posada, L.C., Martínez Chacón, M.L., Fernández, L.P., Villa, E., e Winkler Prins, C.F., 2002. The Asturian Stage: A preliminary proposal for the definition of a substitute for Westphalian D. In: *Carboniferous and Permian of the World*. Editado por L.V. Hills, C.M. Henderson e E.W. Bamber. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 19: 832-850.
174. Díez, J.B., Wagner, R.H., e Bárcena, M.A., 2002. *El Carbonífero (Pensilvánico) De La Montaña Palentina y Paleobosque de Verdeña*. XVIII Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología, Salamanca, Guía de Campo, 16p.
175. Wagner, R.H., Brousmiche-Delcambre, C., e Coquel, R., 2003. Una Pompeya Paleobotánica: historia de una marisma carbonífera sepultada por cenizas volcánicas. In: *Patrimonio Geológico de Castilla-La Mancha*. Editado por R. Nuche. ENRESA, Madrid, pp. 448-475.
176. Amerom, H.W.J. van, Gillespie, W.H., e Wagner, R.H., 2003. *Daubreeia pateraeformis* (Germar) Zeiller, a Stephanian sphenopsid from Western Europe and North America. *Revista Española de Paleontología* 18(2): 159-170.
177. Waveren, I.M. van, Konijnenburg-van Cittert, J.H.A. van, e Wagner, R.H., 2003. *The Permian Jambi Palaeoflora of Sumatra: a progress report*. XVth International Congress Carboniferous and Permian Stratigraphy, Utrecht, Abstracts: 554.
178. Wagner, R.H., 2003. *Palaeolatitude of the Lower Permian Jambi flora from Sumatra*. XVth International Congress Carboniferous and Permian Stratigraphy, Utrecht, Abstracts: 556.
179. Wagner, R.H., 2004. The Iberian Massif: a Carboniferous assembly. *Journal of Iberian Geology* 30: 93-118.
180. Wagner, R.H., 2004. *Gondomaria grandeuryi* (Zeiller) Wagner & Castro, 1998, in the context of an upper Stephanian flora from Surroca (Provincia Girona, Catalonia, Spain). *Treballs Museu de Geologia de Barcelona* 12: 53-67.
181. Wagner, R.H., 2004. Climatic changes as mirrored by Carboniferous and Permian floral distributions. *Monografías del Jardín Botánico de Córdoba* 11: 29-39.
182. Montero, A., e Wagner, R.H., 2004. El Museo de Paleobotánica del Jardín Botánico de Córdoba. *Naturaleza Aragonesa* 13: 76-82.
183. Wagner, R.H., 2005. *Dicranophyllum glabrum* (Dawson) Stopes, an unusual element of lower Westphalian floras in Atlantic Canada. *Revista Española de Paleontología* 20(1): 7-13.
184. Wagner, R.H., 2005. *Alethopteris lancifolia* Wagner, a rare element of the lower Westphalian "Fern Ledges" of Atlantic Canada. *Revista Española de Paleontología* 20(1): 15-19.
185. Wagner, R.H., 2005. Historia del estudio moderno de las floras carboníferas y pérmicas de Iberia y su posición paleogeográfica. In: *VIII Jornadas Aragonesas de Paleontología*. Editado por J.A. Gámez Vintaned, E. Liñán e J.I. Valenzuela-Ríos. La cooperación internacional en la Paleontología española. Instituto Fernando el Católico, pp. 211-226.
186. Wagner, R.H., e Mayoral, E., 2005. El Pérmico inferior de la Cuenca de Valdeviar (Sevilla, SW de España). *Geo-Temas* 8: 263-266.
187. Wagner, R.H., e Díez, J.B., 2007. Verdeña (Spain): Life and death of a Carboniferous forest community. *Comptes Rendus Palevol* 6(6-7): 495-504.
188. Wagner, R.H., e Mayoral, E., 2007. The Early Permian of Valdeviar in Sevilla province, SW Spain: Basin history and climatic/palaeogeographic implications. *Journal of Iberian Geology* 33(1): 93-124.
189. Kullmann, J., Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 2007. Significance for international correlation of the Perapertú Formation in northern Palencia, Cantabrian Mountains. Tectonic/stratigraphic context and description of Mississippian and upper Bashkirian goniatites. *Revista Española de Paleontología* 22(2): 127-145.

190. Wagner, R.H., 2008. *Laveineopteris polymorpha* from the lower Westphalian (Langsettian) "Fern Ledges" at Saint John, New Brunswick, Canada, and comparison with *Laveineopteris hollandica* from Europe. *Revista Española de Paleontología* 23(2): 139-156.
191. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2008. A revision of the Lower Pennsylvanian *Alethopteris lonchitica* (auctorum) and its identity with *Alethopteris urophylla*. *Revista Española de Paleontología* 23(2): 157-192.
192. Montero, A., e Wagner, R.H., 2008. *Las floras terrestres a través de los tiempos geológicos*. Museo de Paleobotánica de Córdoba. IMGEMA, Jardín Botánico de Córdoba, 80p.
193. Nemyrovska, T.I., Winkler Prins, C.F., e Wagner, R.H., 2008. The mid-Carboniferous boundary in the Cantabrian Mountains (N Spain). In: *Problemi stratigrafij Kam'yanovugil'noj Sistemi (Problems concerning the stratigraphy of the Carboniferous System)*. Editado por P.F. Gozhik e S.A. Vizhva. Zbirnik naukovikh prats', Kiev, pp. 69-86. [Volume em homenagem ao Professor Ol'gerd Leonardovich Einor].
194. Wagner, R.H., 2009. Geology of the Palaeozoic strata in northern Palencia. In: *Present and future of Palaeobotany in Southwest Europe*. 16th International Congress OFP, Aguilar de Campoo (Provincia de Palencia, NW Spain), 9-11 setembro 2009, pp. 49-69.
195. ** Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2010. The Carboniferous floras of the Iberian Peninsula: A synthesis with geological connotations. *Review of Palaeobotany and Palynology* 162(3): 239-324.
196. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2010. A redescription of the Stephanian species *Callipteridium virginianum* (Fontaine & White, 1880) comb. nov. and *Alethopteris leonensis* Wagner, 1964. *Scripta Geologica* 7(Special Issue): 93-139.
197. Wagner, R.H., e Mayoral, E., 2010. Comment on "Stratigraphy, petrography and dispersion of the lower Permian syn-eruptive deposits in the Viar Basin, Spain" by S. Sierra, C. Moreno e E. Pascual [Sedimentary Geology 217 (2009) 1-29]. *Sedimentary Geology* 228(3): 328-331.
198. Wagner, R.H., Montero, A., e Álvarez-Vázquez, C., 2010. El Centro Paleobotánico del Jardín Botánico de Córdoba: Museo y Colección de flora carbonífera/pérmica. In: *XI Jornadas Aragonesas de Paleontología, La Paleontología en los museos*. Editado por J.A. Gómez Vintaned. Homenagem ao Professor Eladio Liñán Guijarro. Institución Fernando El Católico (CSIC), Zaragoza, pp. 41-53.
199. Wagner, R.H., 2011. Comment. No major stratigraphic gap exists near the Middle-Upper Pennsylvanian (Desmoinesian-Missourian) boundary in North America: *Palaaios*, v. 26, no. 3, p. 125-139, 2011. *Palaaios* 26(10): 669-670.
200. Wagner, R.H., 2011. Nota necrológica. Jacinto Talens García (1923-2010): una semblanza. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 108(1-4): 23-25.
201. Wagner, R.H., e Castro, M.P., 2011. Compositional changes in a mid-Stephanian (Kasimovian) flora in relation to alluvial plain deposits derived from westward-receding mountains and bordered by the Paleotethys: La Magdalena Coalfield, northwestern Spain. *Palaaios* 26(1): 33-54.
202. Nemyrovska, T.I., Wagner, R.H., Winkler Prins, C.F., e Montañez, I., 2011. Conodont faunas across the mid-Carboniferous boundary from the Barcaliente Formation at La Lastra (Palentian Zone, Cantabrian Mountains, northwest Spain); geological setting, sedimentological characters and faunal descriptions. *Scripta Geologica* 143: 127-183.
203. ** Wagner, R.H., 2012. A critical account of recent records of Devonian megaflora from the Iberian Peninsula, in geological context. *Review of Palaeobotany and Palynology* 171: 95-102.
204. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2012. Las floras carboníferas en la Península Ibérica: usos estratigráficos. *Geo-Temas* 13: 465-468.
205. Álvarez-Vázquez, C., e Wagner, R.H., 2012. La colección de fósiles vegetales del Carbonífero del Centro Paleobotánico del Real Jardín Botánico de Córdoba. *Geo-Temas* 13: 1232-1235.

-
206. Wagner, R.H., Diez, J.B., e Sánchez-Pellicer, R., 2012. Las huellas de un bosque carbonífero: una colonización costera y su ocaso. *Geo-Temas* 13: 179-182.
207. Knight, J.A., e Wagner, R.H., 2012. *Sphenopteris hadrophylla* Knight MS, a possible *Discopteris*, from the Upper Stephanian of NW Spain. *Revista Española de Paleontología* 27(1): 45-66.
208. Wagner, R.H., 2013. El significado de las cuencas carboníferas con flora fósil en Sierra Morena. In: *La Paleontología del Paleozoico, XXIX Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología*. Editado por C. Álvarez-Vázquez e I. López Rodríguez. Libro de Resúmenes, Conferencia de clausura, Córdoba 2-5 de octubre 2013, pp. 41-56.
209. DiMichele, W., Wagner, R.H., Bashforth, A.R., e Álvarez-Vázquez, C., 2013. An update on the flora of the Kinney Quarry of central New Mexico (Upper Pennsylvanian), its preservational and environmental significance. In: *The Carboniferous-Permian Transition in Central New Mexico*. Editado por S.G. Lucas, W.J. Nelson, W.A. DiMichele, J.A. Spielmann, K. Krainer, J.E. Barrick, S. Elrick e S. Voigt. New Mexico Museum of Natural History & Science 59: 289-325.
210. Álvarez-Vázquez, C., e Wagner, R.H., 2014. Lycopside from the lower Westphalian (Middle Pennsylvanian) of the Maritime Provinces, Canada. *Atlantic Geology* 50: 167-232.
211. Knight, J.A., e Wagner, R.H., 2014. Proposal for the recognition of a Siberian Substage in the mid-Stephanian (West European chronostratigraphic scheme). *Freiberger Forschungshefte* C548(22): 179-195.
212. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2015. A coastal forest swamp dominated by *Omphalophloios* C.D. WHITE, in the Autunian (uppermost Stephanian) of Puertollano, south-central Spain. *Palaeontographica Abteilung B* 292(1-3): 33-77.
213. Wagner, R.H., e Álvarez-Vázquez, C., 2016. A reappraisal of *Pecopteris miltonii* (Artis) Brongniart, a mid-Westphalian (Early-Mid Pennsylvanian) fern. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* 61(1): 37-53.
214. Wagner, R.H., e Winkler Prins, C.F., 2016. History and current status of the Pennsylvanian chronostratigraphic units: problems of definition and interregional correlation. *Newsletters on Stratigraphy* 49(2): 281-320.
215. Álvarez-Vázquez, C., e Wagner, R.H., 2017. A revision of *Annularia* and *Asterophyllites* species from the lower Westphalian (Middle Pennsylvanian) of the Maritime Provinces of Canada. *Atlantic Geology* 52: 17-62.
216. Wagner, R.H., 2017. The "global" scheme of Pennsylvanian chronostratigraphic units contrasted with the West European and North American regional classifications: discussion of paleogeographic zones/regions and problems of correlation. *Stratigraphy* 14(1-4): 405-423.
217. Álvarez-Vázquez, C., Bek, J., Knight, J.A., e Wagner, R.H., 2018. Revision and significance of the Westphalian (Middle Pennsylvanian) arborescent lycopsid *Bergeria dilatata* (Lindley & Hutton) Álvarez-Vázquez & Wagner. *Spanish Journal of Palaeontology* 33(1): 5-39.



REPÚBLICA
PORTUGUESA

fct

Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia



MARE

centro de
ciências do mar
e do ambiente