

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA

**CARACTERIZAÇÃO DA RADIOACTIVIDADE AMBIENTE E CONTRIBUTO
PARA ANÁLISE DE RISCO**

APLICAÇÃO À ÁREA DA ANTIGA MINA DA FREIXIOSA

Catarina Caldeira Gusmão

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Georrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida

Monte da Caparica

Setembro 2008

“Poucos temas científicos atraem a atenção do público como a exposição humana a radiações ionizantes. Os meios de comunicação referem frequentemente esta questão, que é também objecto de perguntas frequentes nas assembleias nacionais. As atitudes para com a questão das radiações podem influenciar as grandes decisões sobre os programas energéticos e a poluição ambiental. É, pois, importante transmitir ao público a maior quantidade possível de informação sobre as radiações. Os comentadores centram a sua atenção nas fontes de radiação artificiais como os reactores nucleares e os aparelhos de raios-X. Todavia, as principais fontes de radiação são naturais – raios cósmicos provenientes do espaço extra-atmosférico, raios gama provenientes das paredes e pavimentos e radão das rochas e do solo.”

In "Fontes naturais de radiação ionizante na Europa", Comissão das Comunidades Europeias, Eds. Green, B.M.R., Hughes, J.S. & Lomas, P.R., 1993.

AGRADECIMENTOS

A presente tese de mestrado foi desenvolvida ao longo dos últimos oito meses, no CICEGe – Centro de Investigação em Ciência e Engenharia Geológica, constituindo parte integrante do Mestrado em Georrecursos da FCTUNL.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de forma directa ou indirecta me ajudaram a concluir este trabalho que culmina com esta etapa da minha vida académica, das quais apenas algumas são aqui referidas.

Ao meu orientador Professor José António Almeida sem o qual seria praticamente impossível a realização desta tese. Agradeço ainda a oportunidade e confiança que me deu, assim como toda a ajuda, disponibilidade e sobretudo paciência demonstrada ao longo destes meses.

À EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro, por ter apoiado e financiado a realização das campanhas de campo da presente tese de mestrado, em especial ao Professor José Manuel Gaspar Nero.

À Professora Sofia Barbosa, um obrigado muito especial, por toda a atenção, paciência, disponibilidade, ensinamento e ajuda ao longo de toda a realização do trabalho. Agradeço ainda a revisão da tese.

Ao Drº Guimas agradeço o acompanhamento da segunda parte do trabalho de campo, para além de toda a informação e esclarecimentos prestados, e ainda toda a simpatia e disponibilidade.

Ao Eng.º Pedro Escada pela ajuda prestada nas deslocações.

Ao Srº Luís Lima agradeço o acompanhamento na primeira fase do trabalho de campo, para além de toda a ajuda, simpatia e companheirismo prestados.

Aos meus pilares, a minha mãe e o meu pai, agradeço por tudo e por nada, por serem os meus melhores amigos, os meus cúmplices, e sobretudo porque sem eles era impossível estar aqui. Obrigada.

Aos meus tios, Rosa Helena, Fátima e Zé que me apoiaram desde o primeiro dia e com os quais sei que posso sempre contar.

Ao Professor Paulo Caetano, à Professora Graça Brito, à Professora Mara Lopes, ao Paulo Hasse, ao Daniel Vendas e ao Marco Rocha, pela simpatia e ajuda prestada ao longo de todo o trabalho.

Aos meus colegas, companheiros e amigos especiais, Ana e Daniel, obrigada por partilharem estes anos comigo.

Ao Pedro “Antunes” e ao Nuno “Barreiras”, duas marcas no meu percurso, pessoas que independentemente do caminho que cada um siga nunca vou esquecer.

Ao Paulo, à Telma, ao Filipe, à Bete, ao Cardoso, ao Ramos, ao Ruben, ao João, ao Rui...e todos os meus colegas e amigos que fiz ao longo do curso, obrigada por toda a companhia e disponibilidade.

Ao Marco, André, Zundap e M&m’s por toda a companhia, ajuda e amizade ao longo dos anos.

Ao Fernando, um amigo especial, que me ajudou mais do que imagina.

Aos meus amigos e colegas de engenharia mecânica e civil, que conheci nos primeiros anos da faculdade e com os quais partilhei risadas, gargalhadas e muitas histórias, em particular à Daniela, à Catarina, ao Nuno, ao Mazaroto, ao Daniel, ao André, ao Martim, ao Paulo; em especial ao Bruno e ao Cocas, por todas as boleias que me permitiram chegar a horas à faculdade.

À Ana e à Cristina, porque ser amiga não é só estar presente nas alturas más, é também nos lembrar nas alturas boas. Obrigada por todo o apoio.

A todas as colaboradoras da Biblioteca da FCT, na qual passei grande parte dos meus anos da faculdade.

Aos meus primos, Inês e João que participaram na minha vinda para a FCT.

Ao Sérgio que apesar de tudo me apoiou na concretização deste sonho.

Por fim agradeço a todas as pessoas que embora não me acompanharam em todo o meu percurso foram marcantes na minha meta final, em especial à Marta e à Cláudia.

RESUMO

Na região Centro do País proliferaram, durante quase um século (1907–2001), explorações de minérios de urânio nos granitos do Maciço Hespérico. Todas essas explorações acabaram por encerrar e ficar abandonadas, não tendo sido tomadas medidas para o seu correcto encerramento no tempo considerado, constituindo actualmente um passivo ambiental.

O presente trabalho tem como objectivo a aplicação de uma metodologia, adoptada pela EDM, destinada a caracterizar a radioactividade ambiente e a contribuir para a análise de risco de utilização do local.

A área de estudo é a Mina da Freixiosa, uma pequena exploração de urânio a “céu-aberto” e em subterrâneo, que cessou na década de 80, do século XX.

No âmbito deste trabalho foi efectuada, no local da antiga mina e nas imediações, campanhas de amostragem de radiometria de superfície, radiação externa e emanação de radão do solo.

Fez-se a implantação dos resultados como informação de inventário no SIG e procedeu-se a uma análise estatística e geoestatística. Foram geradas cartas de radiometria de superfície e radiação externa para o local estudado. Foi também calculada a componente da dose efectiva que resulta da radiação externa.

As medições pontuais de emanação de radão do solo permitiram aferir pontualmente os locais de maior risco de construção de habitações.

Palavras-chave

Mina da Freixiosa; urânio; radiometria de superfície; radiação externa; emanação de radão do solo; dose efectiva; krigagem; análise de risco.

ABSTRACT

During almost a century (1907-2001), many uranium ore mines prospered in the Hesperic Massif granites found in the central region of Portugal. Eventually, all these exploitations were terminated and abandoned without, however, correct measures for proper closure being taken, in time considered. Nowadays, these sites represent a significant environmental liability.

The present work aims the application of a methodology, adopted by EDM, to characterize the environment radioactivity and to provide a risk analysis for site reclamation. The case study chosen corresponds to the Freixiosa Mina, a small open pit and underground uranium mina, which closed down in the 1980's.

Part of the work, carried out at the mining site and its surroundings, consisted of a field campaign designed to gather data on surface radiometry, external radiation and soil radon exhalation.

The obtained results were incorporated in a GIS database and were statistically and geostatistically analyzed. This procedure allowed for surface radiometry and external radiation maps being produced and for the calculation of the effective dose that results from external radiation.

Local measurements of soil radon exhalation have allowed the assessment of the highest risk sites for the construction of dwellings.

Key words

Freixiosa Mina; uranium; surface radiometry; external radiation; radon soil exhalation; effective dose; kriging; risk analysis.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objectivos e Metodologia.....	3
1.3	Organização deste Trabalho	5
2	ENQUADRAMENTO DA INDÚSTRIA EXTRACTIVA DO URÂNIO EM PORTUGAL	6
2.1	O Urânio e Minérios de Urânio	6
2.2	Os Jazigos de Urânio em Portugal.....	8
2.3	Exploração do Urânio em Portugal	14
2.3.1	Prospecção	14
2.3.2	Exploração.....	14
2.3.3	Tratamento do Minério.....	15
2.4	O Mercado Mundial dos Minérios de Urânio.....	16
2.5	Principais Aplicações do Urânio	18
3	A ÁREA DA ANTIGA MINA DA FREIXIOSA	19
3.1	Enquadramento Geográfico.....	19
3.2	Prospecção, Exploração e Passivo Ambiental na antiga área mineira da Freixiosa	22
3.3	Descrição Sumária das Infra-estruturas da Mina da Freixiosa	24
3.4	Geologia, Geomorfologia e Tectónica.....	27
3.4.1	Enquadramento geológico regional	27
3.4.2	Enquadramento geológico local	28
3.4.3	Enquadramento geomorfológico	30
3.4.4	Enquadramento tectónico	31
3.4.4.1	Enquadramento tectónico regional.....	31
3.4.4.2	Enquadramento tectónico local	32
3.5	Recursos Hídricos.....	33
3.5.1	Recursos hídricos superficiais	33
3.5.1.1	Enquadramento e caracterização regional.....	33
3.5.1.2	Caracterização na área em estudo	33
3.5.1.3	Qualidade das águas superficiais	34
3.5.2	Recursos hídricos subterrâneos	36
3.5.2.1	Enquadramento hidrogeológico regional	36

3.5.2.2	Enquadramento hidrogeológico local	37
3.5.2.3	Qualidade da água subterrânea.....	37
4	METODOLOGIA DA ANÁLISE DE RISCO	42
4.1	Radioactividade	42
4.1.1	Introdução.....	42
4.1.2	Séries radioactivas	43
4.1.3	Tipos de radiação.....	45
4.1.4	Principais Impactes do Urânio e Respectiveiros Minérios no Ser Humano	46
4.1.5	Medição da radioactividade.....	47
4.1.6	A Dose	48
4.2	Radão	51
4.3	Enquadramento da metodologia da análise de risco.....	53
4.4	Metodologia Adoptada para a Análise de Risco	57
4.4.1	Parâmetros Indicadores Radiológicos	57
4.4.1.1	Cintilómetro de raios gama – SPP2	57
4.4.1.2	Aparelho de medição da radiação externa.....	59
4.4.1.3	Medição do fluxo de radão exalado pelo solo.....	61
4.4.2	Análise Espacial e Estimação por Krigagem.....	62
4.4.3	Desenvolvimento da metodologia	64
5	CARACTERIZAÇÃO DA RADIOACTIVIDADE AMBIENTE E ANÁLISE DE RISCO.....	66
5.1	Caracterização da Radioactividade Ambiente	66
5.1.1	Descrição das campanhas de amostragem.....	66
5.1.2	Radiometria de Superfície	69
5.1.2.1	Análise estatística.....	69
5.1.2.2	Análise espacial e estimação por krigagem.....	73
5.1.2.3	Análise de resultados da radiometria de superfície.....	80
5.1.3	Radiação Externa e Dose Absorvida	80
5.1.3.1	Análise estatística.....	81
5.1.3.2	Análise espacial e estimação por krigagem.....	85
5.1.3.3	Análise de resultados da radiação externa.....	89
5.1.4	Radão	90
5.1.4.1	Análise estatística.....	91
5.1.4.2	Análise de resultados da emanção de radão	92

5.2	Modelo de Análise de Risco adoptado	95
5.2.1	Aplicação à Área Mineira da Freixiosa – Dose Efectiva.....	95
5.2.2	Classificação dos Elementos de Risco Radiométrico.....	99
6	CONCLUSÕES.....	103
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
7.1	Bibliografia electrónica (acedida durante o período Outubro 2007/Agosto 08) 109	
7.2	Cartas	110

ANEXO I - Produção Mundial das Minas de Urânio entre 1998 e 2006 (tons)

ANEXO II - Planta dos Trabalhos Mineiros da Mina da Freixiosa

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Torbernite de cor verde-amarelada (Minas da Urgeiriça).....	13
Figura 2.2 Cotação de U_3O_8 desde 1948 a preços correntes e a preços corrigidos (fonte: The UX Consulting Company, LLC)	17
Figura 3.1 Enquadramento da Mina da Freixiosa em Portugal e na região.....	19
Figura 3.2 Enquadramento das estruturas subterrâneas e da corta de superfície da Mina da Freixiosa	23
Figura 3.3 Chaminé tipo da exploração subterrânea, <i>4NI</i>	24
Figura 3.4 Infra-estruturas da antiga mina nas imediações do poço mestre: A – suportes antigos; B, C, D – fundações de um edifício de apoio; E – Laje de cobertura do poço; F – Abertura na laje para inspecção e monitorização.	25
Figura 3.5 Área do antigo “céu-aberto”: A, B – Perspectiva da área, foto tirada no sentido SW-NE (Fonte: fotos cedidas pela empresa EDM, Outubro de 2007); C, D – Fotos tiradas no sentido SE-NW em Maio de 2008.	26
Figura 3.6 Vista actual da antiga escombreira.....	27
Figura 3.7 Extracto da folha 17B da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (adaptado de IGM, 1990).	29
Figura 3.8 A – Filão de quartzo muito fracturado identificado na área em estudo; B, C – Pormenor da estrutura de quartzo zonado.	30
Figura 3.9 Leituras mensais da CQO na estação de Ferreiros em 2007 (fonte: snirh.pt)	34
Figura 3.10 a) Nascente dos agriões; b) Poço dos agriões	39
Figura 3.11 Poço mestre	39
Figura 3.12 Poço construído no “céu-aberto” A – Enquadramento do poço; B e C – Aspecto da típica água de mina; D – Exemplo de uma amostragem de água onde se pode observar a tonalidade da água.....	40
Figura 3.13 Enquadramento do poço que recolhe água excedente, localizado no antigo “céu-aberto”	40
Figura 4.1 Série de desintegração do ^{238}U (fonte: Human Health Fact Sheet).....	44

Figura 4.2 Série de desintegração do ^{235}U (fonte: Human Health Fact Sheet)	44
Figura 4.3 Série de desintegração do ^{232}Th (fonte: Human Health Fact Sheet)	45
Figura 4.4 Esquema síntese das vias de exposição do Homem às radiações ionizantes (fonte: EDM, 2007)	49
Figura 4.5 Mapa simplificado das principais litologias em Portugal e concentrações de radão (fonte: Oliveira, 2006)	52
Figura 4.6 Variação das concentrações de radão no ar exterior: A – variação anual no hemisfério norte; B – variação diária. (fonte: Oliveira, 2006)	52
Figura 4.7 Cintilómetro SPP2 para a medição da radiometria de superfície.....	58
Figura 4.8 Esquema do detector Geiger-Müller (fonte: Oliveira, 2006).....	59
Figura 4.9 Aparelho de medição da radiação externa	60
Figura 4.10 Medição do fluxo de radão: A – Exposição dos equipamentos; B – Instalação de uma caixa de medição e selagem da base com argila; C – Medição do fluxo um dia depois.	61
Figura 5.1 Malha de amostragem das campanhas de radiometria de superfície para os anos de 2004, 2007 e 2008.	67
Figura 5.2 Malha de amostragem das campanhas de radiação externa para os anos 2004, 2007 e 2008.	68
Figura 5.3 Estatísticos univariados para a área do “céu-aberto” (2004)	70
Figura 5.4 Estatísticos univariados para a área da escombreira (2004).....	70
Figura 5.5 Estatísticos univariados para a envolvente do “céu-aberto” (2007).....	70
Figura 5.6 Estatísticos univariados para a envolvente da escombreira (2007).....	71
Figura 5.7 Estatísticos univariados para a área total (2008).....	71
Figura 5.8 Diagrama de dispersão $R_{\text{sup}2004}$ vs $R_{\text{sup}2008}$	72
Figura 5.9 Diagrama de dispersão $R_{\text{sup}2007}$ vs $R_{\text{sup}2008}$	73
Figura 5.10 Variogramas nas direcções N25°E e N65°W para a radiometria de superfície no “céu-aberto” (2004).....	74

Figura 5.11 Variogramas na direcção NS e EW para a radiometria de superfície da escombreira (2004).....	74
Figura 5.12 Variogramas nas direcções N25°E e N65°W para a radiometria de superfície na área envolvente do “céu-aberto” (2007).....	75
Figura 5.13 Variogramas na direcção NS e EW para a radiometria de superfície na área envolvente à escombreira (2007).....	75
Figura 5.14 Variograma omnidireccional para a radiometria de superfície (2008)	76
Figura 5.15 Imagem estimada da radiometria de superfície para a área do “céu-aberto” e envolvente.....	77
Figura 5.16 Imagem estimada da radiometria de superfície para a escombreira e envolvente.....	78
Figura 5.17 Imagem estimada da radiometria de superfície para a área em estudo (2008)	79
Figura 5.18 Estatísticos univariados para a área do “céu-aberto” (2004)	81
Figura 5.19 Estatísticos univariados para a área da escombreira (2004).....	82
Figura 5.20 Estatísticos univariados para a envolvente do “céu-aberto” (2007).....	82
Figura 5.21 Estatísticos univariados para a envolvente da escombreira (2007).....	82
Figura 5.22 Estatísticos univariados para a área total(2008).....	83
Figura 5.23 Diagrama de dispersão Rext2004 vs Rext2007.....	84
Figura 5.24 Diagrama de dispersão Rext2004 vs Rext2008.....	85
Figura 5.25 Variogramas nas direcções N25°E e N65°W para a radiação externa no “céu-aberto” (2004).....	85
Figura 5.26 Variogramas na direcção omnidireccional para a radiação externa na escombreira (2004).....	86
Figura 5.27 Variogramas nas direcções N65°E e N25°W para a radiação externa no “céu-aberto” e envolvente (2007).....	86

Figura 5.28 Variogramas nas direcções NS e EW para a radiação externa na escombreira e envolvente (2007).....	87
Figura 5.29 Variograma omnidireccional para a radiação externa (2008).....	87
Figura 5.30 Imagem estimada da dose absorvida para o “céu-aberto” (esquerda) e escombreira (direita), 2004.....	88
Figura 5.31 Imagem estimada da dose absorvida para o “céu-aberto” e envolvente (esquerda) e para a área envolvente da escombreira (direita), 2007	88
Figura 5.32 Imagem estimada da dose absorvida $\mu\text{Gy/h}$, 2008	89
Figura 5.33 Malha de amostragem da campanha de emanação de radão (2008)	91
Figura 5.34 Estatísticos univariados para a campanha de emanação de radão.....	92
Figura 5.35 Fluxo radão para os 15 locais amostrados considerados válidos	95
Figura 5.36 Imagens da dose efectiva estimada apenas considerando a componente radiação externa, para o “céu-aberto” (esquerda) e escombreira (direita), 2004	96
Figura 5.37 Imagens da dose efectiva estimada apenas considerando a componente radiação externa, para o “céu-aberto” e envolvente (esquerda) e para a área envolvente da escombreira (direita), 2007	97
Figura 5.38 Imagem da dose efectiva estimada apenas considerando a componente radiação externa (2008)	98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Dados relativos aos isótopos de urânio mais comuns (adaptado de www.sppcr.online.pt)	6
Tabela 2.2 Abundância relativa dos minerais de urânio nos jazigos portugueses (adaptado de Pilar, 1969).....	12
Tabela 3.1 Áreas mineiras de radioactivos do país, distribuídas de acordo com os 4 níveis de intervenção estabelecidos pela EDM (fonte: EDM, 2007).....	20
Tabela 3.2 Locais de amostragem periódica da água subterrânea (fonte: EDM, 2007). 38	
Tabela 3.3 Valores de radionuclídeos (fonte: EDM, 2007).....	38
Tabela 4.1 Características das séries de desintegração de 4 elementos.....	43
Tabela 4.2 Radioactividade de algumas substâncias	48
Tabela 5.1 Dados estatísticos univariados para a radiometria de superfície	71
Tabela 5.2 Dados estatísticos univariados para a radiação externa.....	83
Tabela 5.3 Dados estatísticos univariados das concentrações de radão acumulado na caixa.....	92
Tabela 5.4 Resultados da campanha de emanção de radão	94
Tabela 5.5 Classificação dos elementos de risco quanto à probabilidade de ocorrência	100
Tabela 5.6 Classificação dos elementos de risco quanto à gravidade	100
Tabela 5.7 Lista de elementos de risco radiométrico e classificação por índice de gravidade e de ocorrência.....	101
Tabela 5.8 Matriz dos elementos de risco radiométrico para a Mina da Freixiosa	102

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Ao longo das últimas décadas, e em especial na década de 90, fruto da evolução tecnológica, os aspectos ambientais tornaram-se num dos mais importantes vectores de desenvolvimento das sociedades, principalmente nos chamados países desenvolvidos.

A Indústria Mineira constitui uma das actividades, do sector primário, ambientalmente mais problemática. Nas últimas décadas, o aumento das exigências ambientais, suportadas pela introdução de nova legislação, mais restritiva, e alguma estagnação nas cotações das matérias-primas, levou a que muitas das explorações mineiras deixassem de ser viáveis. Portugal não escapou a essa tendência e grande parte da indústria mineira, tradicionalmente de pequenas dimensões, foi drasticamente reduzida (Pereira, 2003).

Muito recentemente, os acordos de globalização e a conjectura mundiais aceleraram para um novo paradigma de desenvolvimento, assente no consumo massivo de matérias-primas (Costa, 2003; Sobreiro, 2006). Todas as cotações das matérias subiram, e muito em muitos dos casos, destacando-se, no contexto nacional, o sucesso da exploração dos minérios de cobre, zinco e chumbo (principalmente as Minas de Neves-Corvo) e do volfrâmio (Minas da Panasqueira).

Na região Centro do País (Beira Alta e Beira Baixa) proliferaram, durante praticamente todo o século XX (1907–2001), as explorações de minérios de urânio em granitos do Maciço Hespérico, na zona Centro-Ibérica. Actualmente estão inventariados e caracterizados 61 locais de exploração (60 locais são só de exploração) e tratamento. Os centros mineiros da Urgeiriça e da Cunha Baixa (Neves *et al*, 1999), e os respectivos anexos da mina, foram durante bastante tempo as principais unidades de exploração (desmontes e lixiviação). O tratamento e concentração do urânio eram realizados na Oficina de Tratamento Químico, OTQ, da Urgeiriça. As restantes pequenas explorações, a maior parte a “céu-aberto”, exploraram o urânio e expediam os minérios para serem concentrados nestes centros.

Todas as explorações de urânio acabaram por fechar, e ficaram totalmente abandonadas, não tendo sido tomadas na altura, por inexistência de legislação aplicável, as medidas

para o seu correcto encerramento. Os primeiros estudos ambientais, referentes às antigas minas abandonadas, iniciaram-se em 1994–1995. Actualmente, nesses locais, as consequências fazem-se sentir, com diferentes níveis de impacte, de acordo com a complexidade das situações, e evidenciam riscos, radiológicos e não radiológicos, para o ambiente e para a saúde humana (Falcão *et al*, 2005). Importa referir que está em curso um extenso programa de reabilitação destes locais, levado a cabo pela EDM, Empresa de Desenvolvimento Mineiro, S.A., concessionária exclusiva do Estado Português para actividade de recuperação ambiental das áreas mineiras degradadas (Decreto-Lei n.º 198 – A/2001, de 6 de Julho) (Ferreira, 2008).

Embora todas as áreas mineiras constituam áreas geoquimicamente anómalas (à excepção das zonas de filões, onde os valores radiométricos encontrados muito superiores à média da área mineira), as zonas onde existiu anterior actividade, sobretudo onde ocorreram depósitos, exibem locais (em especial as escombreiras e as barragens de rejeitados) com valores muito mais elevados do que o fundo natural. No caso das minas de urânio, este aspecto é evidenciado nas leituras radiométricas, que são mais elevadas em fase pós-exploração do que pré-exploração. Como consequência, as populações que vivem nas imediações têm maior probabilidade de ficarem expostas a radionuclídeos transportados a partir desses locais.

De acordo com estudos realizados *à priori*, um dos principais riscos associados às escombreiras e barragens de rejeitados, das antigas minas de urânio é a emissão por parte dos materiais que as constituem, de radiações, entre as quais se destaca a radiação gama, como a mais penetrante entre os diferentes tipos de radiação. No seguimento desta problemática, temos ainda a emissão do gás radão, um dos descendentes do urânio e um dos principais problemas deste minério. O gás radão entra no organismo através da inspiração, sendo uma das principais causas de cancro no pulmão. A exploração do urânio associa-se igualmente a elevadas concentrações de metais pesados, de significativa toxicidade e que na natureza se encontravam confinados, sendo uma fonte conhecida de contaminação da água superficial e subterrânea, se não forem tomadas medidas especiais para o seu controle.

1.2 Objectivos e Metodologia

O presente trabalho tem como objectivos a aplicação a um caso de estudo de uma metodologia (conforme estabelecida e adoptada pela EDM), destinada a caracterizar a radioactividade ambiente e posteriormente a avaliação do contributo de parâmetros medidores da radioactividade ambiente na determinação de níveis de risco.

A área de estudo é a Mina da Freixiosa, e respectiva envolvente, uma antiga e pequena exploração de urânio que funcionou a “céu-aberto” e em subterrâneo, e que cessou a exploração na década de 80.

O trabalho foi desenvolvido com componente de campo e componente em gabinete.

Em primeiro lugar fez-se recolha de informação relacionada com a área de estudo, em termos das rubricas: geologia, geomorfologia e recursos hídricos. Fez-se ainda pesquisa bibliográfica sobre a exploração das Minas da Freixiosa e sobre o tema em particular.

Seguidamente, iniciou-se uma Base de Dados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com os seguintes temas de informação estruturante: carta militar (excerto da Carta Militar nº 190, edição IGeoE, estrutura matricial), carta geológica (folha 17 B da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, edição IGM, estrutura matricial), rede viária principal, infra-estruturas mineiras e fotografia aérea.

Em simultâneo, fez-se consulta a todos os indicadores ambientais estabelecidos pela EDM das anteriores campanhas de amostragem no local e que incluem resultados de solos, sedimentos de corrente, água superficial e subterrânea, vegetais e campanhas radiométricas. De todos estes indicadores seleccionou-se apenas os radiométricos e fez-se a análise do seu contributo em termos de risco para o caso de estudo concreto.

Com esta informação, fez-se a proposta do plano de amostragem a desenvolver no âmbito deste estudo numa área mais abrangente relativamente à das anteriores campanhas.

Com as cartas e os locais planeados para amostragem, fizeram-se as campanhas de campo de radiometria de superfície e radiação externa. Fez-se ainda a observação e a reportagem fotográfica dos seguintes locais, relacionados com a exploração mineira: poços, escombreira, antigo “céu-aberto”, área à superfície da exploração subterrânea

(nomeadamente os locais das antigas chaminés) e envolvente, linhas de água e afloramentos de interesse.

Os resultados obtidos na fase de trabalho de campo, foram implantados como informação de inventário no SIG (Matos, 2001) e procedeu-se à respectiva análise estatística e geoestatística (Soares, 2000). Foram geradas imagens estimadas de radiometria de superfície e radiação externa, para o local estudado. Com base na imagem estimada da radiometria de superfície, realizou-se uma nova campanha para a medição da emissão de radão no solo, de forma a caracterizar em termos radiológicos toda a área de estudo. Nesta campanha foram tidos em atenção não só as zonas anómalas como o tipo de ocupação do solo. A informação obtida através deste trabalho de campo foi relacionada com os resultados mais antigos de anteriores campanhas de radiometria e que, devido ao maior pormenor das mesmas, possibilitaram uma análise mais fiável.

Com base nas imagens estimadas da radiação externa, foi contabilizada a respectiva dose efectiva a que ficaria exposta uma pessoa que permanecesse nos locais analisados por um período consecutivo de 1 ano. Obteve-se uma nova imagem estimada que interceptada com a carta militar constituiu a base para a Análise de Risco radiométrica do local. As medições pontuais de emissão de radão do solo permitiram aferir sobre o fluxo de emissão do gás, e conseqüentemente se o mesmo representava um risco. Embora não tenha sido analisado, o radão poderá ser medido no interior das habitações.

Para a realização do trabalho de campo foi imprescindível o apoio da empresa EDM, que financiou as campanhas de amostragem de radiometria de superfície, radiação externa e emissão de radão do solo. Os trabalhos de campo foram realizados em duas semanas, nos meses de Abril e Julho de 2008, e acompanhados por um técnico especializado. A EDM forneceu ainda todo o apoio logístico e documental necessário à realização do presente trabalho.

1.3 Organização deste Trabalho

Este trabalho está organizado em 7 capítulos e 2 anexos.

No capítulo 1 faz-se a introdução e apresentam-se os objectivos e a organização do documento.

No capítulo 2 descrevem-se, muito sucintamente, os minérios de urânio, os jazigos, as minas deste minério em Portugal e o mercado mundial.

No capítulo 3 descreve-se, em maior detalhe, o caso de estudo da área da antiga Mina da Freixiosa: história da exploração e passivo ambiental, infra-estruturas mineiras, enquadramento geográfico e geológico, e os recursos hídricos da região.

No capítulo 4 descreve-se, em detalhe, os fundamentos teóricos e a metodologia adoptada na caracterização da radioactividade ambiente e o seu contributo para a análise de risco do local. Destacam-se os principais impactes do urânio e respectivos minérios no ser humano, o cálculo da dose absorvida e efectiva. Descrevem-se ainda os equipamentos e procedimentos utilizados nos trabalhos de campo.

No capítulo 5 faz-se a caracterização radiométrica do local, nomeadamente referindo e comentando todos os resultados obtidos. Apresenta-se também a análise de risco do local da Mina da Freixiosa no que se refere às componentes amostradas.

No capítulo 6 faz-se as conclusões relevantes do trabalho com base nas conclusões retiradas nos capítulos anteriores.

No capítulo 7 apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.

Incluem-se dois anexos: no anexo I) apresentam-se tabelas de indicadores importantes para o estudo e no anexo II) mostram-se as plantas da infra-estrutura subterrânea e do “céu-aberto” da Mina da Freixiosa.

2 ENQUADRAMENTO DA INDÚSTRIA EXTRACTIVA DO URÂNIO EM PORTUGAL

2.1 O Urânio e Minérios de Urânio

O **urânio** é um elemento químico de símbolo U e de massa atómica variável. É um metal, radioactivo, muito duro e denso (densidade = 18,7), de cor cinza a branco prateado. À temperatura ambiente encontra-se no estado sólido.

Foi descoberto em 1789, pelo químico alemão Martin Heinrich Klaproth, que o assinalou na pecheblenda (uraninite) de St. Joachimsthal, na antiga Checoslováquia; outro elemento, o rádio, também estava presente. Posteriormente, em 1841, o francês Eugene-Melchior Peligot isolou o urânio na pecheblenda. Foi ainda o primeiro elemento químico onde se identificou a radioactividade por Henri Becquerel em 1896, fenómeno que será focado no capítulo seguinte do presente trabalho.

Nas ocorrências naturais de urânio coexistem os isótopos 238 e 235, na proporção de 137,7:1 (tabela 2.1). Estes dois isótopos são o ponto de partida para séries de decaimento que terminam em isótopos estáveis de chumbo e incluem o isótopo 234.

Tabela 2.1 Dados relativos aos isótopos de urânio mais comuns (adaptado de www.sppcr.online.pt)

Número de massa	Período de semi-vida (anos)	Abundância (% átomos)	Radioactividade específica ¹
²³⁴ U	255.000	0,0057 ± 0,0002	231 MBq/g
²³⁵ U	70.000.000	0,7204 ± 0,0007	80 KBq/g
²³⁸ U	4.500.000.000	99,2739 ± 0,0007	12,4 KBq/g

O ²³⁵U é uma espécie muito importante pois pode ser facilmente separado e, como é um material físsil, é capaz de sustentar uma reacção em cadeia gerando por isso muita energia calorífica.

¹ O Becquerel (Bq) é uma unidade de actividade, correspondendo a uma desintegração por segundo.

O urânio é um importante constituinte de mais de 100 espécies minerais, no geral associado a terras raras. A sua concentração média na crosta terrestre (*clarke*) está estimada em cerca de $4 \times 10^{-7} \%$, isto é, quatro gramas por tonelada (ppm). Encontram-se vestígios de urânio em quase todas as rochas, por vezes com quantidades inferiores a 0,003 ppm. Os depósitos minerais têm concentrações superiores a 350 ppm (Raguin, 1961).

As rochas sedimentares, em particular as rochas carbonatadas e os xistos betuminosos, possuem frequentemente concentrações de urânio acima do *clarke*. Todas as rochas eruptivas contêm vestígios de urânio, mas são as rochas ácidas, como os granitos, que contêm os teores mais elevados. Já nas rochas básicas, as concentrações de urânio são menos importantes. Nos meteoritos foram identificados alguns elementos radioactivos.

Até à 2ª Guerra Mundial, os minérios de urânio constituíam apenas uma fonte comercial de rádio (pode extrair-se cerca de um grama de rádio por cada 3,3 toneladas de urânio). O urânio tinha aplicações limitadas e, na altura, era lançado para as escombrelas. Após os primeiros ensaios para a utilização de energia nuclear, por Enrico Fermi e os seus colaboradores em 1934, e Otto Hahn e Fritz Strassmann em 1938, em 1945 os minérios de urânio e de tório foram pesquisados e analisados relativamente à sua utilidade. Como primeira consequência desses estudos, parte das antigas escombrelas de urânio e rádio foram reaproveitadas.

Das várias classificações existentes para o estudo dos minerais uraníferos portugueses a que suscita maior interesse, devido à sua complexidade e organização, é a de D'Arcy George, editada em 1949. Contém uma divisão principal de base genética e vários subgrupos de base química cujas designações derivam da natureza dos radicais aniónicos. De acordo com esta classificação, os minerais radioactivos coordenam-se em três grupos, do seguinte modo (Pilar, 1969):

I – Minerais hipogénicos de urânio: óxidos simples e óxidos múltiplos, com todos ou só alguns dos seguintes elementos: nióbio, tântalo, titânio e terras raras.

II – Minerais hipogénicos de tório: óxidos simples, óxidos complexos, silicatos simples, silicatos complexos e fosfatos simples.

III – Minerais supergénicos de urânio: óxidos hidratados, fosfatos hidratados, arseniados hidratados, vanadatos hidratados, sulfatos hidratados, carbonatos hidratados e silicatos hidratados.

A designação de mineral hipogénico e supergénico são consequência dos fenómenos que levaram á sua formação, origem profunda, no primeiro caso, e origem superficial, no segundo caso. Embora no decorrer deste trabalho esta classificação não seja mais focada, foi importante dentro do enquadramento ao minério urânio apresenta-la.

2.2 Os Jazigos de Urânio em Portugal

Apesar do conhecimento dos jazigos portugueses ser anterior a 1950, só a partir desse ano se realizaram os primeiros trabalhos para a classificação destes depósitos minerais.

Foram assim consideradas várias classificações, como as que se baseavam nas características da ganga siliciosa do enchimento filoniano para o caso dos jazigos primários, e no tipo de rocha onde se aloja a mineralização secundária, no caso dos jazigos secundários. De todas as classificações, destaca-se a que foi proposta por R. Cavaca, em 1964, *in* Pilar, 1969, que divide os jazigos uraníferos da seguinte forma:

I – Jazigos filonianos epitermais

A – Filões epitermais siliciosos, encaixados em granitos hercínicos, com ganga de jaspe e sílica calcedónica, em geral mineralizados com pecheblenda e sulfuretos, e com abundantes minerais secundários de urânio;

B – Filões epitermais siliciosos, encaixados em granitos hercínicos ou em zonas de contacto deste com o Complexo xistoso ante-Ordovícico, com ganga predominante de quartzo branco, por vezes defumado, com crescimentos zonados e frequentes cristalizações em geodes, em geral mineralizados com pecheblenda e sulfuretos, e com abundantes minerais secundários de urânio;

C – Sistemas de filonetes epitermais, pouco siliciosos, encaixados em granitos hercínicos ou em rochas metamórficas de contacto destes com o Complexo xistoso ante-Ordovícico, em geral mineralizados com pecheblenda e sulfuretos de ferro, e com abundantes minerais secundários de urânio.

II – Jazigos de impregnação de minerais secundários de urânio

- A – Impregnação de minerais secundários de urânio em brechas quartzo-limoníticas, no encosto de filões de quartzo branco, ou em brechas graníticas;
- B – Impregnação de minerais secundários de urânio em granitos alterados;
- C – Impregnação de minerais secundários de urânio em diques doleríticos alterados;
- D – Impregnação de minerais secundários de urânio em rochas metamórficas de contacto dos granitos hercínicos com o Complexo xistoso ante-Ordovícico;
- E – Impregnação de minerais secundários de urânio em depósito sedimentar detrítico (aluvião recente).

Os jazigos uraníferos portugueses encontram-se relacionados com os vários sistemas de fracturação incluídos nas orogenias hercínica e alpina, que interessaram a Península Ibérica. A sua importância faz com que pertençam à “cintura metalogenética europeia de urânio”.

Segundo Neiva, 2003, do ponto de vista geográfico, Portugal apresenta três províncias uraníferas:

- Província uranífera do Douro e Trás-os-Montes – apresenta o menor número de jazidas de urânio, sendo também a menos importante, de referir a jazida Horta da Vilariça (Moncorvo, Bragança);
- Província uranífera do Alto Alentejo – as jazidas mais importantes localizam-se em Nisa (Portalegre), Vila Viçosa, Terena (Alandroal), Mocissos (Rosário), Oriola (Portel) e Barrancos;
- Província uranífera das Beiras – localizada na região central do país, inclui toda a Beira Alta e uma pequena parte da Beira Baixa e Beira Litoral, apresenta o maior número de jazidas de urânio, sendo a mais importante e explorada no passado.

A maior parte das jazidas de urânio localizam-se no centro do país, sendo os distritos de Guarda e Viseu os que englobam a quase totalidade dos mesmos. Dispostos na parte ocidental do Maciço Hespérico, distribuem-se em forma de arco, contornando a

extremidade nordeste do maciço da Serra da Estrela. Correspondem ao resultado dos movimentos orogénicos provocados pela colisão de duas placas tectónicas continentais, abrangendo a Cordilheira Central (Serra da Estrela, Lousã, S. Pedro de Açor, Guardunha) e estendendo-se para poente até às Serras do Buçaco, Caramulo e Montemuro. Nesta região os jazigos geralmente encontram-se encaixados em granitos monzoníticos, de duas micas, especialmente o do tipo porfiróide de natureza calco-alcalina, as texturas são variadas mas em geral de grão grosseiro, de idade hercínica (são as rochas dominantes da região contribuindo com 40% da cobertura da respectiva área), ocorrem também, embora em menor percentagem, e distribuídos de forma irregular, nas rochas de contacto deste granito com o Complexo xisto-grauváquico ante-Ordovícico, essencialmente nas regiões de Seia, Sabugal, Tondela e Albergaria-a-Velha. Este complexo é um testemunho de uma antiga formação continua, depositada no fundo do mar que no Câmbrico, cobriu o ocidente da Península Ibérica, posteriormente sujeita à influência de diversos movimentos orogénicos, dos quais os mais importantes foram os hercínicos. O enquadramento geológico é completado por várias formações Paleozóicas – Ordovícico, com orientação NW-SE e depósitos Ceno-Antropozóicos.

Afloramentos de rochas graníticas de cor avermelhado nos jazigos da Beiras derivado à impregnação dos feldspatos por minúsculos cristais de hematite, acompanhado de alterações, sobretudo das biotites e de tectonização, localizam-se sobretudo em zonas de fracturas e em estruturas filonianas uraníferas, com direcção N10°-60°E, embora em alguns casos não se perceba tal ligação.

Segundo Ávila Martins, *in* J.E.N. 1968, um dos indicadores para a presença de mineralização uranífera nos filões quartzosos da região das Beiras, é a afluência de óxidos de ferro em crostas e em impregnações difusas, ao longo de fracturas, formando densa rede de vénulas limoníticas.

Através da análise estrutural, do tipo de jazigos e as suas idades relativas, os jazigos de minérios metálicos da Província das Beiras, podem agrupar-se em dois grupos distintos, segundo Cerveira, A., *in* Pilar 1969:

- a) Ligação com direcções estruturais NW-SE da orogenia hercínica;
- b) Ligação com direcções estruturais NE-SW da orogenia alpina.

Sob o ponto de vista do interesse económico e mineiro, por ordem crescente, tem-se:

I – Jazigos pegmatíticos, em estruturas irregulares: Sn, W, Ti, Mo, Ta, Li, Be, U;

II – Jazigos filoneanos em relação com a orogenia hercínica: Sn, W, Au, Ag, As, Pb, Zn, Fe;

II – Jazigos filoneanos em relação com a orogenia alpina; Pb, Zn, Sb e U, pirite e calcopirite;

IV – Depósitos elu-aluvionários: Sn, Ti, Ta, Va, U.

As formações da província uranífera do Douro e Trás-os-Montes estão incluídas no Complexo xisto-grauváquico do Vale do Douro.

No Alentejo as jazidas dispersam-se pelo maciço granítico de Castelo de Vide e pela auréola de contacto com os xistos que o limitam a norte, encontram-se relacionadas com rochas xistentas metamorfizadas do endocontacto, onde os granitos uraníferos se encontram a poucas centenas de metros de profundidade².

Em suma, em Portugal as jazidas são, na grande maioria, filonianas. Nas Beiras e NNE do Alentejo estão principalmente relacionadas com granitos y_{2b}^{II} , y_{3b}^{II} , y_{3c}^{II} e y_{3d}^{II} ³ (Carta Geológica de Portugal, 1/500.000, 1992), que cortam e atravessam metassedimentos da zona do endocontacto com esses mesmos granitos. A região do Alto Alentejo, juntamente com a das Beiras, foram as primeiras regiões a merecer um estudo mais pormenorizado por parte da J.E.N. em 1955 (Neiva, 2003). Anos mais tarde, em 1976, a prospecção foi alargada para as outras regiões do soco hercínico, nomeadamente a região de Trás-os-Montes.

De acordo com os vários estudos realizados, podem-se distinguir cinco fases paragenéticas dos filões de urânio (J.E.N., 1968):

Fase 1: Sericitização do granito com ataque das biotites, oligóclase microclina. As biotites apresentam elevada percentagem de halos pleocróicos e diminutas quantidades de minérios radioactivos;

² Segundo Neiva (2003), os granitos uraníferos tem um teor de U superior ao do *clarke* dos granitos, que segundo Taylor, 1964 *in* Neiva, 2003, é de 4 ppm.

³ Os teores de urânio nas unidades y_{2b}^{II} , y_{3b}^{II} , y_{3c}^{II} e y_{3d}^{II} são respectivamente, U = 5-14ppm, U = 6-21ppm, U = 6-13ppm e U = 8ppm.

Fase 2: Ligação com as fracturas de cisalhamento. Ataque dos silicatos das rochas encaixantes e ocorrência de sílica coloidal e óxidos de ferro. Ocorrência de jaspe de coloração vermelha. Desenvolvimento da sílica, geralmente com óxido de ferro, em filões de jaspe e quartzo ferruginoso;

Fase 3: Reposição de fracturas e produção de pecheblenda coloidal e microbotrioidal em filões de quartzo criptocristalino, defumado, zonado;

Fase 4: Segunda fase de mineralização pela pecheblenda pulverulenta microbotrioidal. As ocorrências dos iões de Fe, em fases anteriores à deposição maciça de iões U, explicam-se pela selectividade gravitacional dado o maior peso atómico deste último elemento;

Fase 5: Produção de brechas de falha, caolinização e deposição da calcite.

Em 1965, a Junta de Energia Nuclear (J.E.N.) iniciou um estudo para a classificação dos minerais uraníferos portugueses. Este estudo permitiu sintetizar os resultados da forma que se apresentam na tabela 2.2. O estudo foi realizado como base em 192 jazigos minerais no território nacional (Pilar, 1969).

Tabela 2.2 Abundância relativa dos minerais de urânio nos jazigos portugueses (adaptado de Pilar, 1969)

Minerais de urânio identificados		Percentagem de jazigos em que ocorrem em Portugal	
Minerais negros	Pecheblenda	20-25%	
	Parapecheblenda	Cerca de 5%	
	Óxidos negros	20-25%	
	Cofinite	Menos de 5%	
Gumites		Cerca de 5%	
Minerais corados	Silicatos	Uranofana α	Cerca de 5%
		Uranofana β	Cerca de 5%
	Fosfatos	Autonite	70-75%
		Torbenite	45-50%
		Uranocircite	15-20%
		Sabugalite	Cerca de 20%
		Saleíte	5-10%
		Fosfuranilite	10-15%
		Parsonite	Menos de 5%
		Sulfatos	Uranopilite
	Zipeite		Menos de 5%

No grupo I, dos minerais negros, o mineral mais abundante é a pecheblenda que foi identificada pela primeira vez em Portugal em 1945. Este mineral é uma variedade criptocristalina, colóide da uraninite, usualmente muito mais oxidada do que esta, e com um conteúdo em tório e terras raras relativamente baixo.

O grupo II, apresenta exclusivamente a gumite. É uma mistura de cor alaranjada de óxidos de urânio e silicatos que resultam da hidratação natural e oxidação da pecheblenda. Segundo alguns autores, constitui o limite entre os minerais negros e os minerais coloridos.

O grupo III, corresponde ao grupo dos minerais secundários. Os minerais em destaque são a autonite e a tobernite (figura 2.1), os dois mais abundantes nos jazigos portugueses. Nestes jazigos também é comum encontrar-se sabugalite e saleíte; esta última é comum em Portugal apesar de ser considerada uma espécie rara. A tobernite encontra-se em geral associada a filões de quartzo branco, zonado e defumado (exemplo do distrito uranífero do Reboleiro) ou em filões de jaspe vermelho (exemplo do distrito uranífero da Bendada); a autonite ocorre geralmente associada a filões de quartzo branco ou ferruginosos com algum jaspe (exemplo do distrito uranífero da Guarda), em filões de jaspe vermelho-acastanhado ou negro (exemplo do distrito mineiro da Urgeiriça) as duas espécies minerais ocorrem com proporção semelhante. O mineral mais raro em Portugal é a parsonite, apenas identificada num jazigo.



Figura 2.1 Torbernite de cor verde-amarelada (Minas da Urgeiriça)

Apesar dos estudos mineralógicos terem abrangido grande parte dos jazigos portugueses, a variedade de minerais identificados é reduzida. A maior parte dos minerais de urânio, encontrados nos jazigos portugueses, são produtos secundários, ou supergénicos, com colorações quase sempre vivas e variadas, ao contrário dos primários que são escuros (Pilar, 1969; Teixeira, 1964).

2.3 Exploração do Urânio em Portugal

O primeiro jazigo urano-radífero português foi descoberto em 1907. A primeira concessão para exploração mineira de minérios radioactivos foi a Rosmaneira em 1913. A exploração de urânio iniciou-se só uns anos mais tarde.

Na exploração dos jazigos de urânio em Portugal consideraram-se essencialmente três fases: prospecção, exploração e tratamento do minério.

2.3.1 Prospecção

Tem como objectivo a descoberta do jazigo. Inicia-se com prospecção geral, aérea, auto-transportada ou apeada, onde este último método era o único utilizado nas antigas explorações de urânio. Após a descoberta de uma anomalia radiométrica, avançam-se para os estudos de pormenor, com uma prospecção mais detalhada (construção de cartas de isorádicas). Se a área continuar a revelar algum interesse, segue-se o reconhecimento da zona anómala através de sanjas e, posteriormente, por sondagens. Depois de conhecida a extensão, a profundidade e o teor da mineralização é que se conclui se a anomalia inicialmente identificada pode constituir um jazigo (massa mineral com interesse económico) passando-se para a fase de exploração.

2.3.2 Exploração

Se a prospecção for bem sucedida, conhecidas a tipologia e a morfologia do jazigo, define-se o método de desmonte. A exploração do minério de urânio pode ser feita em subterrâneo, a “céu-aberto” ou mista. O principal problema da exploração a “céu-aberto” é a limitação da profundidade, em função do ângulo de talude da corta. No caso

dos jazigos filoneanos, quanto mais profundo for o “céu-aberto” maior é a relação estéril/minério (REM) e facilmente podem ser atingidos valores limite.

Nas explorações a “céu-aberto”, a quantidade de escombro e os impactes ambientais são habitualmente mais significativos do que na exploração em subterrâneo. Nas explorações convencionais de urânio a selecção dos minérios é feita na frente com um cintilómetro. De acordo com a localização da exploração, existe sempre um “teor de corte” sobre o qual os minérios são considerados rentáveis ou não rentáveis.

No desmante em subterrâneo os teores atingidos são regra geral mais elevados enquanto que a relação estéril/minério é mais baixa.

A elevada solubilidade do urânio permite ainda, a recuperação de alguns minérios através da lixiviação *in situ*, ou seja, injeção de soluções ácidas ou alcalinas nos maciços e posterior recuperação para a superfície por bombagem. Estes métodos têm a vantagem de minimizarem os trabalhos subterrâneos e o risco de exposição dos trabalhadores às radiações mas tem grandes inconvenientes do ponto de vista ambiental, gerando resíduos tóxicos e radioactivos e um grande impacte no meio hídrico.

A lixiviação ácida foi utilizada nas fases finais da exploração das Minas da Cunha Baixa da Urgeiriça e Bica, enquanto que a lixiviação estática se utilizou nas minas da Quinta do Bispo e Cunha Baixa para aproveitamento de “minérios pobres”.

2.3.3 Tratamento do Minério

O tratamento do minério tem como objectivo a extracção e a concentração da substância útil.

Os sistemas de tratamento convencionais têm britadores e moinhos, de bolas ou de barras, onde a rocha é fragmentada até dimensões de 20 mm ou inferiores. As partículas finas são misturadas com a água de forma a produzir uma lama fina de partículas suspensas em água. As lamas são lixiviadas com ácido sulfúrico de forma a dissolver o óxido de urânio que é posteriormente recuperado da solução. Os rejeitados, que são em percentagem ponderal elevada, são separados por filtração da solução rica de urânio. No final do processo de enriquecimento, é feita uma troca iónica das soluções enriquecidas, e o produto final é precipitado e seco obtendo-se o óxido concentrado de urânio, com

cerca de 99% em U_3O_8 , ou seja, mais de 80% de U, que é o produto comercial, designado por “*Yellow-Cake*”.

Em certos casos, o urânio pode encontrar-se na água subterrânea, de onde provém cerca de 20% do urânio extraído em todo o mundo. Neste caso, a sua extracção é feita através da oxigenação da água, bombeando água para o exterior (lixiviação *in situ*). Com o oxigénio injectado, a circulação de água é feita através de uma área aquífera fechada que prende o mineral às partículas que nela circulam em geral areias. A solução da lixiviação do urânio dissolvido é então bombeada para a estação de tratamento que se encontra à superfície. O urânio é separado por troca iónica e recuperado como precipitado químico de peróxido de urânio ($UO_4 \cdot 2H_2O$).

Os rejeitados destes processos são depositados em escombrelas ou barragens de lamas, onde os níveis de radiação podem ser 20 a 100 vezes superiores aos níveis naturais dos encontrados nas jazidas superficiais. Se não for feito nenhum tratamento adequado, são necessários milhares de anos até se atingir um nível aceitável de radiação. Um dos produtos provenientes do decaimento do urânio nestes locais é o radão.

2.4 O Mercado Mundial dos Minérios de Urânio

De acordo com a *World Nuclear Association, WNA*, (dados de 2008) os maiores depósitos de urânio localizam-se nos EUA, Canadá, Rússia e França. Todavia, o Canadá (25%), a Austrália (19%) e o Kazaquistão (13%) são os maiores produtores actuais de urânio (ver tabela, anexo I.1), onde metade da exploração é subterrânea. No que respeita a reservas, a Austrália detém 27% das reservas de urânio, seguida pelo Kazaquistão com 17% e pelo Canadá com 13%.

Na figura 2.2 mostram-se as cotações do concentrados de urânio para um período de tempo alargado (1948-2007), onde se podem identificar as oscilações deste minério, que teve essencialmente três picos, entre 1953 -1957, 1976 -1978 e mais recentemente entre Agosto de 2004 e Agosto de 2007 onde o preço do óxido de urânio quintuplicou. No entanto, desde essa data, decresceu 50%. Ao contrário de outros metais, não existe um valor oficial de mercado para o urânio, os indicadores de preço que servem de referência às transacções no mercado são desenvolvidos por um número pequeno de

organizações privadas. A exploração deste minério relaciona-se essencialmente, com as necessidades da sociedade e a descoberta de novas jazidas.

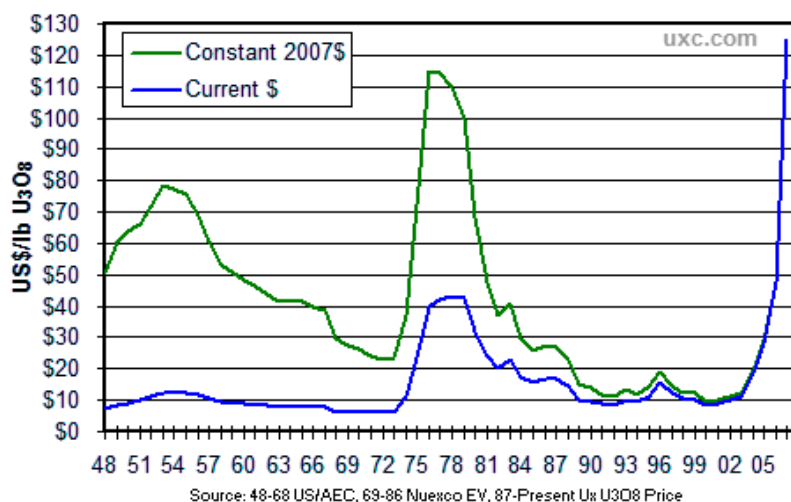


Figura 2.2 Cotação de U₃O₈ desde 1948 a preços correntes e a preços corrigidos (fonte: The UX Consulting Company, LLC)

Segundo dados da Empresa Nacional de Urânio (E.N.U.), Portugal, no ano de 1983, colocava-se entre o 3º e 4º lugar entre os países da Europa Ocidental com maiores recursos de urânio; no entanto, à escala mundial os quantitativos constituíam cerca de 0,38% dos recursos mundiais.

Os recursos de urânio eram, aproximadamente, de 17.700 toneladas, distribuídos do seguinte modo:

- Recursos razoavelmente assegurados a custos inferiores a US\$80/Kg U (6.700 tons U);
- Recursos razoavelmente assegurados recuperáveis a custos compreendidos entre US\$80 - US\$130/Kg U (1.500 tons U);
- Recursos adicionais estimados recuperáveis a custos inferiores a US\$80/Kg U (2.500 tons /U);
- Recursos especulativos a custos inferiores a US\$130/Kg U (7.000 tons U).

A WNA refere ainda que a produção de urânio em Portugal terminou em 2002 (foram ainda exploradas / negociadas 2 tons), sendo que em 1998 se iniciou uma descida substancial deste recurso, ao contrário de outros países onde a partir desta data aumentaram a sua produção (ver produções mundiais por países, Anexo I).

Actualmente o comércio de urânio é restrito aos países que são signatários do *Tratado de Não Proliferação Nuclear*, e cuja sua utilização seja para fins pacíficos permitindo inspecções internacionais

2.5 Principais Aplicações do Urânio

As primeiras utilizações do urânio foram na indústria do vidro e porcelana, para a obtenção de determinadas colorações, através dos sais de urânio.

Actualmente as aplicações do urânio são várias, nomeadamente, a indústria bélica, energética, medicina, alimentar, e outras.

Na indústria bélica destaca-se a utilização do urânio empobrecido, que é composto essencialmente pelo isótopo ^{238}U . Pode provir de duas fontes distintas, subproduto do processo de enriquecimento do urânio natural ou de combustível nuclear usado. O urânio empobrecido é um material de muito elevada densidade que é utilizado em bombas para penetração de blindagens.

Na geração da electricidade utilizam-se os três isótopos do urânio (^{234}U , ^{235}U e ^{238}U), com mecanismos de reacção ligeiramente diferentes, embora o mais utilizado seja o ^{235}U . Cerca de 16% da electricidade é obtida através do urânio em reactores nucleares.

Na medicina são utilizados isótopos radioactivos para diagnóstico e pesquisa. Através da emissão de raios gama pode-se obter informações sobre a anatomia e o funcionamento dos órgãos. No tratamento de doenças, como o cancro, são aplicados isótopos radioactivos. Outra utilização comum é a esterilização de equipamentos médicos por radiação gama. Na preservação de alimentos, os isótopos radioactivos são utilizados para exterminar parasitas e pragas e ainda no controle do amadurecimento da fruta e verdura armazenada. Outras utilizações são, por exemplo, a análise de poluentes no ambiente e no estudo do movimento da água da superfície e subterrânea (traçadores).

3 A ÁREA DA ANTIGA MINA DA FREIXIOSA

3.1 Enquadramento Geográfico

A Mina da Freixiosa localiza-se na região centro/norte do país, na freguesia com o mesmo nome, concelho de Mangualde, distrito de Viseu (figura 3.1). Situa-se a oeste da povoação da Freixiosa, e a este da pedreira do Fical (exploração de granito para britas).

A área da freguesia da Freixiosa é de aproximadamente 7,16 km² e, segundo dados dos censos de 2001, tem cerca de 280 habitantes; o local é atravessado pela Estrada Nacional 16.

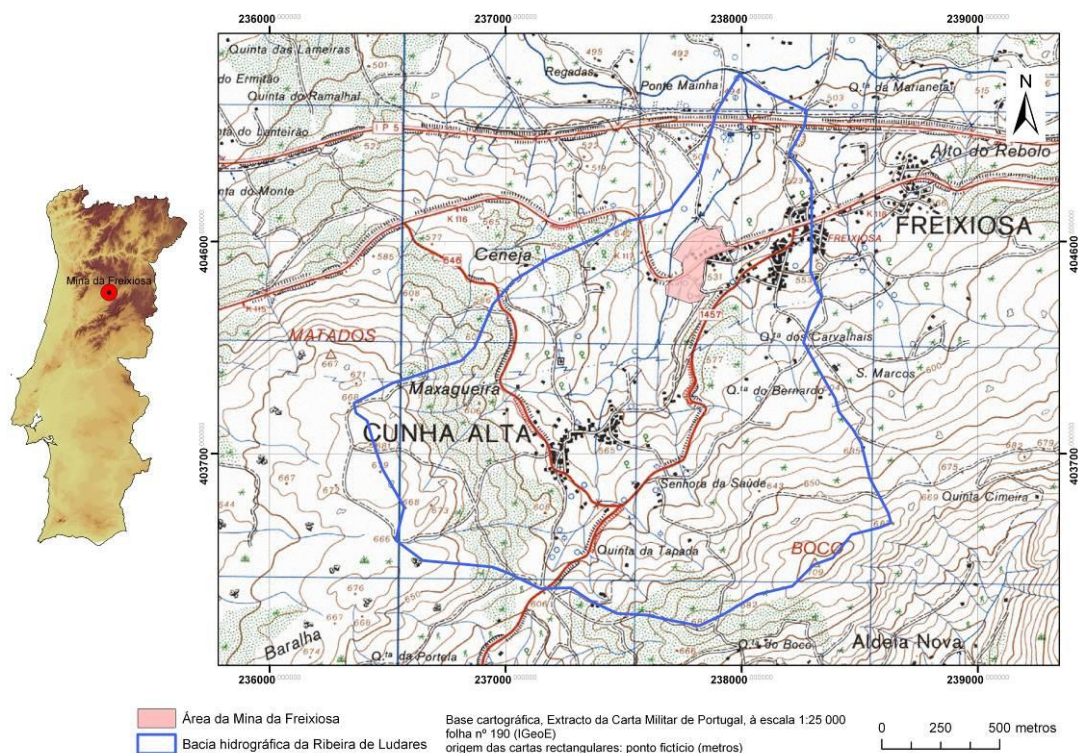


Figura 3.1 Enquadramento da Mina da Freixiosa em Portugal e na região

Actualmente, as principais actividades económicas da região são a agricultura e os lacticínios. Todavia, nos anos 70 e 80, a principal actividade foi a indústria extractiva.

A região da Freixiosa encontra-se sob a influência Atlântica sendo caracterizada por um clima temperado, húmido, com elevada pluviosidade, acentuada nebulosidade e pequenos desvios anuais de temperatura. Os ventos predominam no quadrante nordeste (NE). A cota média ronda os 520 m.

A exploração mineira desenvolveu-se a “céu-aberto”, e em subterrâneo, no sopé de uma encosta, com declive moderadamente acentuado para NW. Era uma mina de pequena dimensão que ocupava uma área aproximada de 44.401 m². Pertence ao grupo de minas da Quinta do Bispo, do qual fazem parte um total de 16 minas, todas elas de minérios radioactivos e actualmente abandonadas. Apresenta um nível de intervenção 3.

A tabela 3.1 apresenta as 61 áreas mineiras de radioactivos do país, dividido por 4 grupos de intervenção, esta divisão foi feita com base numa análise multicritérios que tem em conta as distâncias à povoação e a presença de ecossistemas. Cada grupo representa (EDM, 2007):

Grupo 1 – Minas que apresentam os maiores impactes ambientais sendo, pois, de intervenção prioritária;

Grupo 2 – Minas com níveis de impacte intermédios, em que os principais problemas resultam da existência de resíduos de operações de processamento;

Grupo 3 – Minas com níveis de impacte intermédios a baixos em que apenas se verificaram operações de extracção;

Grupo 4 – Minas com níveis de impacte baixo a muito baixo. Incluem-se neste grupo áreas já sujeitas a acções de remediação e áreas apenas sujeitas a trabalhos de prospecção e ensaios de extracção.

Tabela 3.1 Áreas mineiras de radioactivos do país, distribuídas de acordo com os 4 níveis de intervenção estabelecidos pela EDM (fonte: EDM, 2007)

Nível de intervenção	Áreas mineiras	Tipo de lavra	Lixiviação e/ou OTQ	Distância à povoação mais próxima (km)	Volumes totais de resíduos (m ³)	Estações de tratamento de efluentes
1A	Urgeiriça	SUB	LIX+OTQ	0,0	3.150.000	Sim
	Cunha Baixa	SUB+CA	LIX	0,0	288.500	Sim
	Quinta do Bispo	CA	LIX	0,8	1.075.100	Sim
	Bica	SUB	LIX	0,8	49.300	Sim
1B	Castelejo	CA	LIX	2,0	781.900	Sim
	Vale da Abrutiga	CA		2,0	462.000	-
	Senhora das Fontes	SUB+CA	LIX(+OTQ)	1,0	38.380	-
2	Vales	SUB	LIX(+OTQ)	1,5	13.810	-
	Forte Velho	SUB	LIX	2,0	11.680	-

Nível de intervenção	Áreas mineiras	Tipo de lavra	Lixiviação e/ou OTQ	Distância à povoação mais próxima (km)	Volumes totais de resíduos (m³)	Estações de tratamento de efluentes
	Rosmaneira	SUB	LIX	0,5	15.200	-
	Vale d'Arca	SUB	LIX	1,0	23.200	-
	São Domingos	SUB+CA	LIX(+OTQ)	1,7	7.130	-
	Barracão	-	FAB RÁDIO	0,0	13.000	-
3	Barroco I	CA	-	2,0	80.000	-
	Canto do Lagar	CA	-	2,5	46.000	-
	Ribeira do Bôco	CA	-	2,0	52.000	-
	Espinho	CA	-	0,5	76.360	-
	Mondego Sul	CA	-	1,0	596.520	-
	Corga de Valbom	CA	-	2,0	26.660	-
	Valdante	CA	-	0,8	33.000	-
	Prado Velho	CA	-	0,9	178.306	-
	Barroco D. Frango	CA	-	0,6	40.020	-
	Freixinho	CA	-	1,0	37.500	-
	Pêra do Moço	CA	-	0,0	12.830	-
	Maria Dónis	CA	-	1,0	67.690	-
	A-do-Cavalo	CA	-	0,7	55.770	-
	Mortórios	CA	-	2,5	155.000	-
	Fontinha	CA	-	1,5	168.460	-
	Freixiosa	SUB+CA	-	0,0	1.760	-
	Picoto	SUB+CA	-	1,1	11.320	-
	Tentinolho	SUB+CA	-	1,5	21.880	-
	Pinhal do Souto	SUB	-	0,0	42.000	-
	Formiga	SUB	-	0,8	1.980	-
	Vale Covo	SUB	-	2,0	1.650	-
	Alto da Várzea	SUB	-	1,0	25.310	-
	Barroca Funda	SUB	-	2,0	6.140	-
	Carrasca	SUB	-	0,5	11.260	-
	Coitos	SUB	-	0,7	3.900	-
	Cruz da Faia	SUB	-	2,0	7.630	-
	Pedreiros	SUB	-	1,5	3.320	-
	Corguinha e Prazos	SUB	-	0,8	220	-
Ervideira	SUB	-	1,2	1 075	-	
Ferreiros	SUB	-	1,0	3.740	-	
Fonte Velha	SUB	-	0,8	13.850	-	
Lenteiros	SUB	-	0,4	5.570	-	
Mestras	SUB	-	0,0	4.520	-	

Nível de intervenção	Áreas mineiras	Tipo de lavra	Lixiviação e/ou OTQ	Distância à povoação mais próxima (km)	Volumes totais de resíduos (m ³)	Estações de tratamento de efluentes
	Reboleiro	SUB	-	0,0	23.160	-
4	Póvoa de Cervães	CA	-	1,0	37.650	-
	Sevilha	CA	-	0,7	arrasada	-
	Tapada dos Mercados	CA	-	0,3	arrasada	-
	Ribeira do Ferro	CA	-	2,5	2.000	-
	Quinta das Seixas	CA	-	2,0	880	-
	Vale do Tamão	CA	-	1,8	1.800	-
	Vale da Videira	CA	-	0,3	7.100	-
	Cótimos	SUB+CA	-	1,8	330	-
	Alto da Rasa	SUB	-	1,8	430	-
	Luz	SUB	-	0,3	arrasada	-
	Carril	SUB	-	0,5	2.420	-
	Pai Moniz	TMI	-	1,0	arrasada	-
	Sentinela	TMI	-	0,9	700	-
	Fontainhas-Gradiz	TMI	-	1,2	arrasada	-

CA - "céu-aberto"; SUB – subterrânea; TMI – trabalhos mineiros incipientes.

3.2 Prospecção, Exploração e Passivo Ambiental na antiga área mineira da Freixiosa

Durante os períodos áureos do urânio, nas décadas de 50 e 60, houve um forte incremento da fase de prospecção. Com meios rudimentares, mas com equipas especializadas, todo o país, mas em especial a região centro (Viseu, Guarda, Coimbra), foi prospectada para estes minérios.

Neste tipo de campanhas utilizavam-se cintilómetros como o SPP2, para medição dos níveis da radiometria da superfície e dose absorvida.

Para permitir a prospecção rápida dos locais, com delimitação expedita das zonas potenciais, as primeiras campanhas foram auto-portadas. Foram assim delimitados alguns dos que viriam a ser os jazigos nacionais de minérios radioactivos mais importantes. A Mina da Freixiosa foi um desses casos. Os trabalhos mineiros desenvolveram-se numa área coberta por pinhal, a 30 metros das traseiras de uma escola primária e com terrenos agrícolas na área envolvente (figura 3.2).

A exploração iniciou-se em 1971, em subterrâneo, a partir de um primeiro piso a cerca de 50 m de profundidade na parte mais alta. Posteriormente, explorou-se a “céu-aberto” uma zona aflorante do filão a cerca de 200 m a NNE do poço mestre, que atingiu o primeiro piso da exploração subterrânea. Todavia, a exploração a “céu-aberto” foi sempre muito menos importante do que a exploração em subterrâneo.

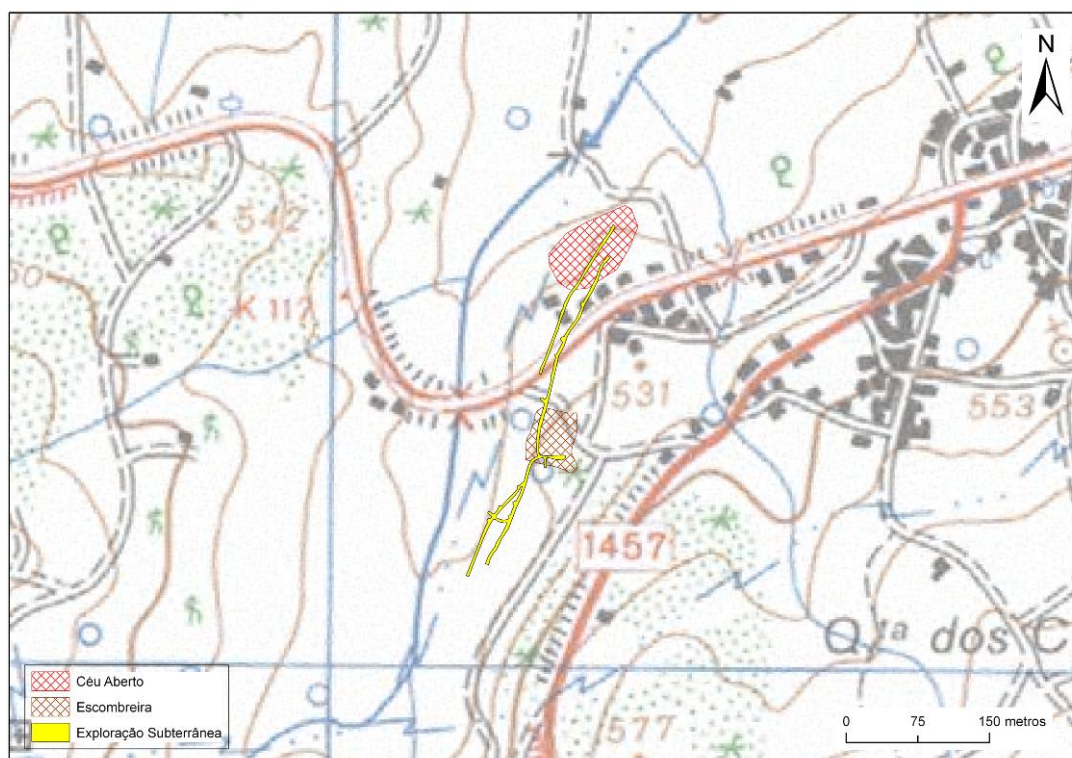


Figura 3.2 Enquadramento das estruturas subterrâneas e da corta de superfície da Mina da Freixiosa

Quando a cotação do minério começou a descer, a exploração subterrânea foi a primeira a encerrar em 1982, dois anos mais tarde, em Setembro de 1984, terminou também a exploração a “céu-aberto”.

A produção total acumulada na Mina da Freixiosa foi de 84.181 tons de U_3O_8 , dos quais 23.265 tons foram explorados a “céu-aberto” (27,6%). O teor médio em U_3O_8 foi de 0,14%, sendo que os teores mais pobres eram da ordem de 0,118%. Todo o minério extraído foi transportado para a lavaria da Urgeiriça por camião onde foi concentrado e expedido.

3.3 Descrição Sumária das Infra-estruturas da Mina da Freixiosa

Conforme referido anteriormente, as infra-estruturas principais da Mina da Freixiosa são a exploração subterrânea, a corta de superfície e as escombreiras (figura 3.2).

Actualmente, cerca de 24 anos depois do seu encerramento, os vestígios da antiga exploração mineira são escassos: as áreas do “céu-aberto” e escombreira foram modeladas e os trabalhos subterrâneos foram preenchidos com escombros de baixo teor em urânio, estando actualmente inacessíveis.

A exploração em subterrâneo desenvolveu-se a partir de 2 pisos, no sentido aproximadamente NS. Desenvolveram-se ao todo cerca de 560 metros de galerias, com um entre-piso e diversas chaminés (ver plantas no anexo II).

O primeiro piso desenvolveu-se à profundidade média de 20 m (o terreno à superfície é um flanco de encosta), ao longo de 175 m de comprimento. Existiam 2 chaminés de ventilação *6NI* e *4NI*, distanciadas entre si de 45 m. Na figura 3.3 mostra-se o local à superfície da antiga chaminé da exploração subterrânea *4NI*, a única ainda visível na área mineira, que se localiza a montante do antigo “céu-aberto” e nas imediações de um terreno cultivado.



Figura 3.3 Chaminé tipo da exploração subterrânea, *4NI*

O segundo piso desenvolveu-se 50 m abaixo do primeiro, a cerca de 70 m da superfície, ao longo de 360 m. Desenvolveram-se 5 chaminés de ventilação (*2NI*, *3NI*, *4NI*, *5NI* e *6NI*), entre os pisos e entre estes e a superfície. Existiu ainda um poço mestre, que era o

meio de transporte do minério para a superfície e funcionava também como chaminé de ventilação (figura 3.4).



Figura 3.4 Infra-estruturas da antiga mina nas imediações do poço mestre: A – suportes antigos; B, C, D – fundações de um edifício de apoio; E – Laje de cobertura do poço; F – Abertura na laje para inspeção e monitorização.

O entre-pisos dividia-se em dois, um a jusante do poço mestre com 140 m de comprimento e que abrange as chaminés 2NI e 3NI e outro a montante do poço mestre

com cerca de 110 m de comprimento; apresentava 2 chaminés auxiliares *OSI* e *ISI* que distavam entre si 67 m, aproximadamente.

Com o cessar da exploração subterrânea, e para minimizar a probabilidade de ocorrência de subsidências, todo o volume subterrâneo foi preenchido com materiais da escombreira através do enchimento hidráulico das galerias, os acessos foram selados.

Por razões de segurança, o poço mestre está coberto com uma laje de betão com $2 \times 4 \text{ m}^2$, que inclui um respiradouro, usado para inspeção e monitorização. Toda a área envolvente está ocupada por terrenos agrícolas e pinhal.

O “céu-aberto” desenvolveu-se numa área pouco extensa, com cerca de 5.056 m^2 (ver plantas no anexo II). A sua presença é denunciada actualmente por uma pequena depressão após ter sido modelada com material com baixo teor em urânio e colocada uma camada de terra vegetal no final da exploração (figura 3.5).



Figura 3.5 Área do antigo “céu-aberto”: A, B – Perspectiva da área, foto tirada no sentido SW-NE (Fonte: fotos cedidas pela empresa EDM, Outubro de 2007); C, D – Fotos tiradas no sentido SE-NW em Maio de 2008.

A escombreira situa-se nas imediações do poço mestre (figura 3.6). Ocupa uma pequena área, com cerca de 1.177 m², e encontra-se à cota mais alta da área mineira, a cerca de 530 m, e a espessura máxima é de 2,5 m. O material, estimado em cerca de 2.000-3.000 tons, está disposto sob a forma de flanco de encosta.



Figura 3.6 Vista actual da antiga escombreira

Apesar de habitualmente as escombreiras impedirem o desenvolvimento da vegetação, devido ao tipo de solo existente, pouco espesso e algo pedregoso, tipicamente associado a granitos, a zona apresenta coberto vegetal bem desenvolvido, constituído essencialmente por pinheiros bravos e outra vegetação espontânea de médio porte, não evidenciando problemas de estabilidade.

Durante a fase de exploração existiram duas escombreiras, uma só com materiais provenientes da exploração subterrânea, e com um volume maior do que o actual; e outra com material proveniente do “céu-aberto”, localizada nas imediações do mesmo e com teores mais baixos do que a primeira. Com o encerramento da exploração a “céu-aberto” todo o material da escombreira foi utilizado para o enchimento e modelação da corta, ficando, desta forma, a mina com uma só escombreira.

3.4 Geologia, Geomorfologia e Tectónica

3.4.1 Enquadramento geológico regional

A área mineira da Freixiosa insere-se no Maciço Hespérico, um dos fragmentos do soco hercínico Europeu. É uma das mais antigas unidades geomorfológicas da Península Ibérica, constituída por formações antigas, Pré-Câmbricas (com 1000 a 570 milhões de

anos) e Paleozóicas (570 a 245 milhões de anos), que foram afectadas por fenómenos de metamorfismo, associados a diversas fases tectónicas da orogenia hercínica. Ocupa a parte central e ocidental da Península Ibérica.

O Maciço Hespérico encontra-se dividido em 3 unidades: a Zona Centro Ibérica (ZCI) onde se enquadra a área de estudo, a Zona de Ossa Morena (ZOM) e a Zona Sul-Portuguesa (ZSP). Na ZCI ainda se individualizam três unidades: o Complexo Xisto Grauváquico (ou também designado por Supergrupo Dúrico-Beirão), uma unidade extensa e monótona com fácies do tipo flysch, constituído essencialmente por xistos e grauvaques; os Quartizitos Armoricanos, uma unidade arenítica inferior, do Ordovícico, discordante sobre a unidade anterior; e os Granitos Hercínicos (grupo das Beiras), em geral monzoníticos, de grão grosseiro, porfiroídes, tardi a pós-tectónicos da série tardia (F3).

3.4.2 Enquadramento geológico local

De acordo com a folha 17B da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000, edição do IGM 1990, região de Fornos de Algodres, na área em estudo afloram rochas eruptivas do Ordovício médio, com orogénese tardi a pós-tectónica relativamente a F3 (figura 3.7).

Estas rochas pertencem à formação do granito de Freixiosa-Mesquiteira, cuja litologia é a de um granito de grão médio (y_{3c}^{II}), de duas micas, com esparsos megacristais, diferente do granito regional, grosseiro e porfiróide que caracteriza a região das Beiras. Segundo Neiva, 2003, este granito corresponde a uma pulsação magmática distinta, provavelmente de um magma granítico anatótico derivado de refusão parcial do Complexo Xisto-Metagrauváquico. Os granitos têm entre 278 e 305 milhões de anos.

Por sua vez, esta formação encontra-se inserida na faixa de Viseu-Tondela-Gouveia, que é constituída por quartzo e jaspe brechificados, com direcções N30° - 50°E e N50° a 70°E, stockworks mineralizados por pecheblenda, sulfuretos e minerais secundários coloridos de urânio.

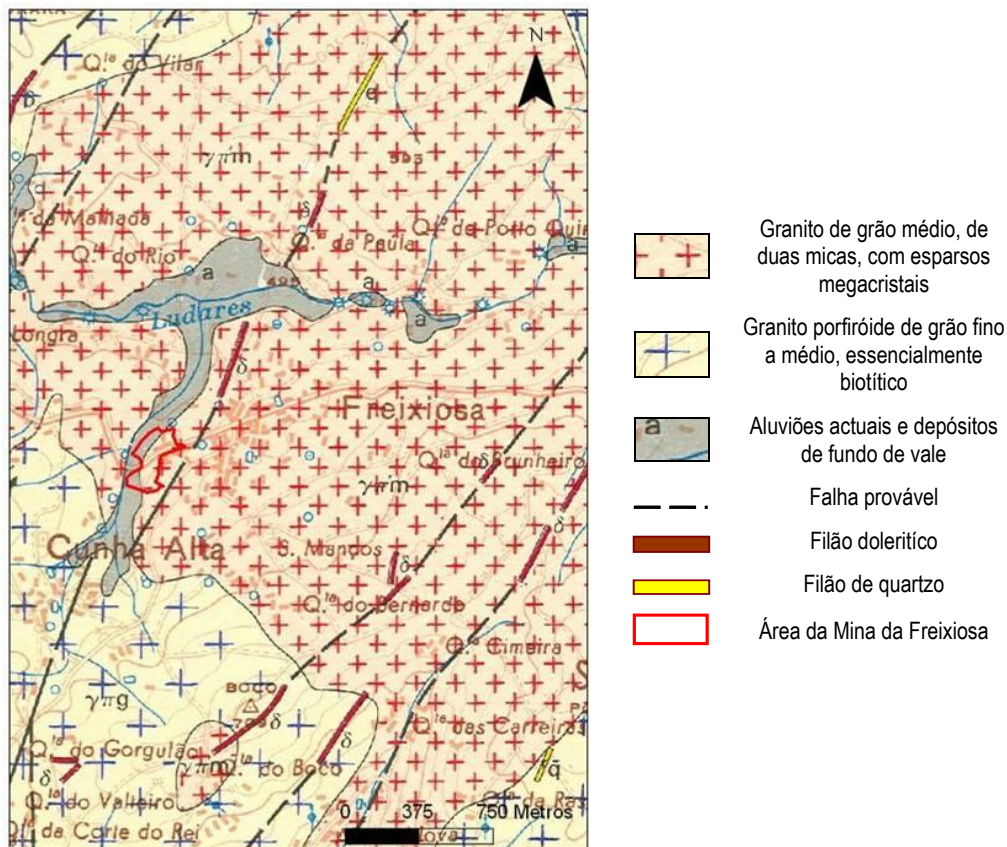


Figura 3.7 Extracto da folha 17B da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (adaptado de IGM, 1990).

Localmente, o granito apresenta alteração hidrotermal, no contacto da brecha quartzo-limonítica da mina, com sericitização intensa e caulnização dos feldspatos. Evidencia também pigmentação castanha devido à presença de hidróxidos de ferro. O maciço granítico apresenta-se muito fracturado. Uma das estruturas importantes no local é um filão de quartzo que intersecta a antiga exploração subterrânea, no limite Este da área de estudo (figura 3.8).

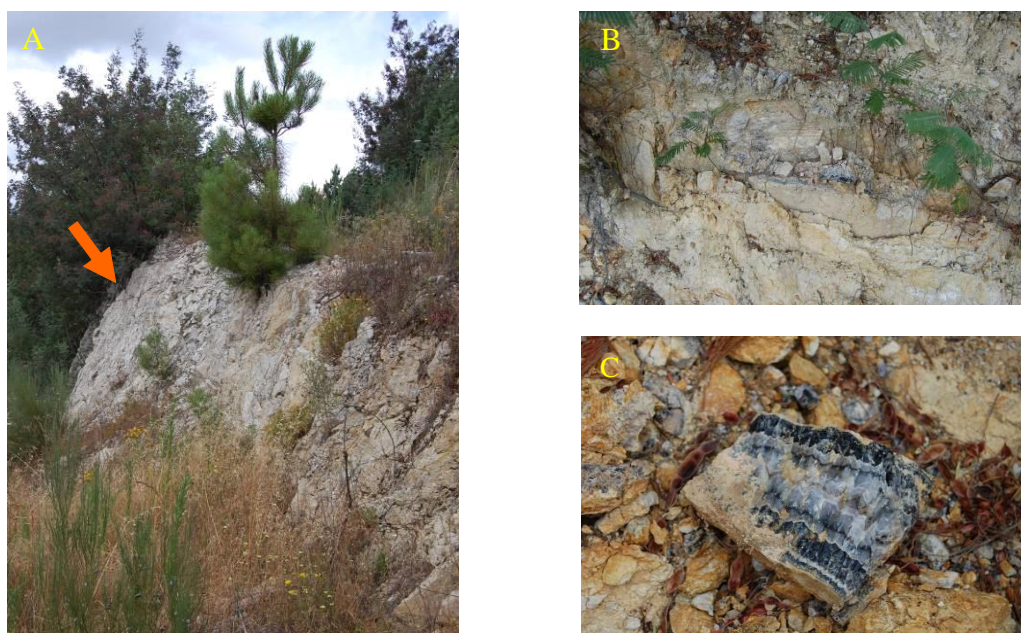


Figura 3.8 A – Filão de quartzo muito fracturado identificado na área em estudo; B, C – Pormenor da estrutura de quartzo zonado.

Nas linhas de água e terrenos marginais encontram-se depósitos aluvionares, constituídos por areias finas e siliciosas, misturadas com terra vegetal; a sua origem está relacionada com a meteorização dos granitos. Estes depósitos aluviais formaram-se durante o Quaternário e assentam sobre os granitos.

As principais mineralizações de urânio são a autunite (fosfato de cálcio e urânio hidratado), de cor amarela-esverdeada, a torbernite (fosfato cuprífero e de urânio), de cor verde, e a pecheblenda de cor escura.

3.4.3 Enquadramento geomorfológico

Segundo J.E.N., 1968, sob o ponto de vista geomorfológico, a região insere-se num conjunto denominado, Maciço Antigo Ibérico, cuja formação data dos finais da Era Paleozóica. Desde essa altura, todo o maciço foi sujeito a um processo prolongado de erosão e aplanção das suas formas sofrendo posteriormente um rejuvenescimento na Era Cenozóica, com os movimentos alpinos. Todo este processo provocou uma alteração no relevo, condicionando a rede hidrográfica, que se encontra parcialmente

subordinada a linhas de fractura bem definidas, com direcção predominante do quadrante NE. Entre as falhas mais importantes cita-se a da Vilariga.

Na região central situa-se o ponto mais elevado do país o vértice geodésico “Estrela”, onde se localiza a serra com o mesmo nome (1993 m). Por constituir um “horst” a partir da Serra da Estrela, toda a região das Beiras, passa por zonas de elevação e depressão tanto para ocidente como para oriente. Sob o ponto de vista morfológico a região terá correspondido a vasta peneplanície que se estendeu, à parte entre Aveiro, Viseu e Guarda, continuando para além de Braga e Vila Real. As rochas predominantes da região são as pertencentes ao Complexo xisto-grauváquico, proporcionando formas lisas e suaves e por vezes vales cavados e de paredes abruptas, e os granitos hercínicos que apresentam em geral, os altos cumes, os relevos que estas formações originam são marcados pela erosão diferencial. Em alguns locais é possível encontrar quartzitos ordovícicos, que apresentando uma elevada dureza e resistência, ocupam áreas restritas, constituindo relevos escarpados que em algumas zonas se alongam por vários quilómetros.

3.4.4 Enquadramento tectónico

3.4.4.1 Enquadramento tectónico regional

Segundo Neiva, 2003, em Portugal as jazidas uraníferas classificam-se nos seguintes modos:

1. Filões de quartzo;
2. Filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia;
3. *Stockworks* e disseminações em xistos e granitos;
4. Brechas filonianas, graníticas ou xistentas, quartzo-jaspoíde;
5. Brechas filonianas, graníticas ou xistentas, quartzo-limoníticas;
6. Vénulas de pecheblenda e flourite;
7. Impregnações secundárias;
8. Depósito lacustre.

Do ponto de vista regional a jazida explorada na Mina da Freixiosa é do **tipo 1**. O filão de quartzo é frequentemente maciço, leitoso a acinzentado, preenchendo uma zona de falha. Esta por sua vez rejogou e fracturou longitudinalmente o quartzo, gerando fragmentos de dimensões heterogéneas. Uma nova solução ascendeu e formaram-se cristais de quartzo que cresceram normalmente às paredes das fracturas e em direcção ao centro do intervalo destas. Esta nova solução de quartzo é leitoso, por vezes, hialino, ametista, hematóide e defumado, com um franco zonamento. É frequente a estrutura bandada dos filões, que se distingue pela cristalinidade do quartzo, pelas colorações apresentadas, e pela fracturação dos filões segundo o seu alongamento e nos contactos com a rocha encaixante e por onde penetram as soluções mineralizantes.

Os filões encaixam no granito, e por vezes nas rochas xistentas, nas proximidades do contacto com o granito. Em alguns locais apresenta estrutura brechóide, com os fragmentos das rochas dos hasteais cimentados pelo quartzo do enchimento filoniano, passando deste modo a brechas filonianas. São subverticais e predominam as direcções NNE-SSW, e por vezes ENE-WSW.

3.4.4.2 Enquadramento tectónico local

Segundo Pilar, 1969, as ocorrências do urânio estão ligadas ao granito através de brechas e filões. Os filões uraníferos são constituídos por quartzo microbotrioidal e jaspe mineralizado por pecheblenda, nas estruturas de falha, brechificadas. O ciclo de fracturação ter-se-ia produzido a partir de sistemas preenchidos por quartzo branco e microcristalino acastanhado e jaspe, ocorrendo posteriormente falhas e brechas. O conjunto foi posteriormente preenchido por minério negro de urânio e pecheblenda.

Segundo EDM, 2007, a estrutura principal é formada por um filão de quartzo branco, brechificado, com minerais oxidados de cobre, óxidos e hidróxidos de ferro e quartzo defumado (indicador da presença de minerais radioactivos) e jaspe, com uma direcções variáveis sendo dominante no quadrante NE (a direcção média é N30°E) e pendor entre 68°SE e 87°NW. A possança é variável podendo atingir 3 metros. São poucos os filões mineralizados com urânio. A mineralização de autunite ocorre numa brecha quartzo-limonítica. Existe uma rede de diques diabásicos, com direcção média NE-SW.

Sobre a área mineira da Freixiosa encontram-se duas falhas prováveis, praticamente paralelas entre si, ver figura 3.7 (pág. 29). Uma destas falhas, cujo preenchimento é feito por dolerito e quartzo, deu origem ao filão presente na região, onde se encontra a mineralização.

3.5 Recursos Hídricos

3.5.1 Recursos hídricos superficiais

3.5.1.1 Enquadramento e caracterização regional

A área mineira enquadra-se na sub-bacia hidrográfica da ribeira de Ludares, afluente da margem direita do rio Dão, para onde conflui a cerca de 5,7 km da mina, ver figura 3.1 (pág. 19). Esta sub-bacia, faz parte da bacia hidrográfica do Mondego.

O rio Dão nasce no distrito da Guarda, na região dos planaltos de Trancoso-Aguiar da Beira. Corre no sentido nordeste-sudoeste e tem 98 km de comprimento; a bacia tem uma área de 1.377 km². É um afluente da margem direita do Rio Mondego, onde desagua próximo da Barragem da Agueira.

A Bacia do Mondego é a segunda maior do país em área e drena o maior rio com nascente em Portugal. Tem uma área de 6.645 km² com o eixo principal na direcção nordeste-sudoeste à cota média de 375 m. É a bacia com maior utilização dos recursos hídricos, sobretudo na componente hidroeléctrica e agrícola.

3.5.1.2 Caracterização na área em estudo

A ribeira de Ludares corre numa direcção aproximada NS (de sul para norte), a menos de 200 m da antiga exploração. No aluvião da ribeira de Ludares observou-se uma nascente de água que drena para a ribeira.

Esta linha de água cruza a área mineira actuando potencialmente como meio receptor de lixiviados, apresentando um carácter temporário.

Do ponto de vista morfológico, as linhas de água da região classificam-se como de tipo dendrítico, com ângulos de confluência geralmente reduzidos, assemelhando-se aos ramos de uma árvore. Este é o tipo predominante em Portugal.

3.5.1.3 Qualidade das águas superficiais

A freguesia da Freixiosa é abastecida pela Barragem de Fagilde, por alguns furos localizados na região, e poços.

No contexto regional, a qualidade das águas superficiais é bastante razoável reflectindo a ausência de fontes poluidoras importantes, tais como fossas sépticas, individuais ou colectivas.

A avaliação da qualidade da água é feita de acordo com o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto, que estabelece as normas, critérios e objectivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos.

Neste trabalho fez-se uma pesquisa da qualidade das águas superficiais da região, nas redes de monitorização sob supervisão do Instituto da Água (INAG) e da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR-LVT). Os dados encontrados são escassos.

A estação de monitorização mais próxima é a de Ferreiros, na sub-bacia do Rio Dão, concelho de Viseu, localizada a montante da área mineira, relativamente à qual se apresentam as leituras mensais de Carência Química de Oxigénio (CQO), figura 3.9, referentes a 2007.

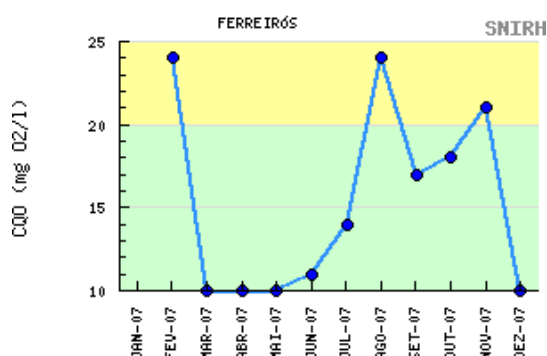


Figura 3.9 Leituras mensais da CQO na estação de Ferreiros em 2007 (fonte: snirh.pt)

No ano em análise, a qualidade da água foi considerada como pertencente à classe C (razoável). Esta classe indica que é suficiente para a irrigação, usos industriais e produção de água potável após tratamento rigoroso; permite a existência de vida piscícola (espécies menos exigentes) mas com reprodução aleatória; apta para recreio sem contacto directo rigoroso.

Relativamente à CQO, os valores são mais elevados (superiores a 17 mg O₂/l) de Agosto a Novembro, e no mês de Fevereiro; entre Março e Junho os valores são mais baixos (inferiores a 10 mg O₂/l) que por sua vez são os aceitáveis para uma qualidade de água de classe excelente. Não se pode afirmar qual a razão dos valores elevados de CQO, pois seria necessário um estudo mais exaustivo ao local, no entanto, como a estação se situa a montante da área mineira e a linha de água que a atravessa tem sentido oposto à estação de Ferreiros, pode-se concluir que este valor não está relacionado com a mina.

Enquanto num contexto regional se pode dizer que a água apresenta condições normais para o seu consumo, o mesmo não acontece a nível local, essencialmente devido à antiga exploração mineira.

Desde 2004, a EDM tem realizado análises periódicas a duas linhas de água localizadas a montante e a jusante da área mineira (códigos, respectivamente, FXSW4, e FXSW6). Os parâmetros radiológicos são menos significativos do que nas águas subterrâneas, ao contrário dos parâmetros hidroquímicos, que apresentam valores mais elevados, por exemplo os nitratos apresentam valores de 7,1 meq/l e 5,4 meq/l e o potássio 1,7 meq/l e 1,2 meq/l, respectivamente para FXSW4 e FXSW6 (EDM, 2007), estes valores relacionam-se com a prática de actividades agrícolas na região.

Estudos realizados pelo LNETI, entre 1976 e 1983, mostraram a existência de concentrações elevadas de ²²⁶Ra nas águas da mina, com média de 12 Bq/l, sendo este valor muito superior à média encontrada nas águas dos granitos e em minas onde houve lixiviação ácida. Actualmente, devido ao enchimento da mina, as concentrações foram reduzidas, apresentando em todos os locais monitorizados valores inferiores a 1 Bq/l (o valor mais elevado é de 0,73 Bq/l e localiza-se no poço construído no “céu-aberto”). Em toda a área existem poços, no aluvião a jusante, para exploração de água, alguns deles

utilizados na rega de culturas, resultando na subsequente contaminação de culturas e do próprio terreno, no entanto esta contaminação é localizada.

3.5.2 Recursos hídricos subterrâneos

3.5.2.1 Enquadramento hidrogeológico regional

A zona em estudo faz parte da unidade hidrogeológica do Maciço Hespérico, em particular a ZCI, sendo considerada uma zona pouco estudada do ponto de vista hidrogeológico. As litologias presentes no maciço são essencialmente rochas cristalinas fracturadas ou fissuradas, com escassa aptidão hidrogeológica. Mesmo assim, desempenham um papel local muito importante na agricultura, existindo numerosas captações de água subterrânea para abastecimento.

Devido à presença de rochas duras, ocupando áreas muito extensas, com condições geomorfológicas, de alteração e de fracturação bastante diversificadas, o modo de ocorrência e de escoamento da água subterrânea, é condicionado. O escoamento e o armazenamento faz-se predominantemente nas fracturas, podendo ter lugar nos intergranulares quando a alteração é significativa. Quando existe em simultâneo os dois tipos de interstícios, há trocas de água entre as fracturas e os poros intergranulares. Deste modo os aquíferos que ocorrem neste tipo de rochas são muito vulneráveis a determinados tipos de contaminação, devido ao modo de circulação da água as velocidades de circulação podem ser elevadas e o poder de filtração do meio reduzido.

Existem pequenos aquíferos dispostos de forma descontínua ao longo das maiores linhas de água, aumentando em dimensão e importância nos trechos inferiores dos rios. Muitas das explorações realizadas nestes aquíferos conduzem a um “prejuízo” no caudal de escoamento superficial, devido à infiltração da água no leito dos rios. O nível estático acompanha as variações sazonais do nível da água no rio, estando a uma cota muito próxima da cota da superfície da água no rio. São aquíferos muito vulneráveis, e sujeitos a risco de contaminação pela água de escoamento superficial e pela agricultura praticada nas áreas envolventes. Têm por suporte as aluviões recentes, isto é, areias e areias com seixos e calhaus e um substrato rochoso impermeável de granitos, xistos e grauvaques, e depósitos arcósicos, conforme a localização.

A recarga faz-se por infiltração directa da precipitação e dos cursos de água superficiais.

3.5.2.2 Enquadramento hidrogeológico local

A área assenta sobre zonas potenciais para a recarga do aquífero sub-superficial (coberto de solo e maciço granítico alterado) e profundo (maciço granítico fracturado e corredores estruturais) e sobre zonas com potencial para a descarga.

3.5.2.3 Qualidade da água subterrânea

Em geral, as águas apresentam baixa mineralização e qualidade química aceitável. No entanto, devido à reduzida capacidade de reacção do meio, o pH das águas subterrâneas é, em geral, baixo. A acidez é adquirida pela dissolução de dióxido de carbono, durante a sua passagem pelo solo, podendo os valores baixar até pH 5.

Por se tratar de aquíferos pequenos, com escasso poder regulador, muitas captações são afectadas por contaminação de origem microbiológica e antropogénica.

A análise dos parâmetros obtidos numa análise de água subterrânea da estação de monitorização de Ferreirós, em 18 de Outubro 2006, mostra que, de acordo com os valores máximo recomendado (VMR) e máximo admissível (VMA), estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 236/1998, para os parâmetros em análise, apenas a sílica (19 mg/l) ultrapassa o valor máximo admissível (0,01 mg/l). O elevado valor encontrado na estação em estudo para o elemento sílica necessitaria de um estudo mais aprofundado para se poder identificar qual a sua origem, contudo é importante referir a presença de um maciço granito, onde ocorre percolação de água cujo teor em sílica é enriquecido, todavia não se pode afirmar que estes valores elevados estão correlacionados com a presença de urânio.

Na zona em estudo foram inventariados pela EDM diversos poços, ao longo de campanhas sucessivas no campo. Por se tratar de uma zona predominantemente agrícola, encontram-se poços cuja utilização da água varia desde o consumo próprio à rega. Periodicamente são analisados 4 locais, de acordo com a tabela 3.2. As campanhas de amostragem foram realizadas em Julho e Dezembro de 2004, e recentemente em Maio de 2007.

Tabela 3.2 Locais de amostragem periódica da água subterrânea (fonte: EDM, 2007)

Referência da amostra	Local
FXSW1	Nascente dos agriões
FXSW2	Poço mestre
FXSW3	Nascente jusante da área mineira
FXSW5	Poço construído no "céu-aberto"

Em todas as amostras o pH varia entre 6 e 7, o que indica a presença de uma água ligeiramente ácida, comum num meio como o que foi estudado.

Factores como a localização, utilização e níveis mais elevados de radionuclídeos, fazem com que as amostras FXSW1, FXSW2 e FXSW5 sejam as mais problemáticas, tabela 3.3.

Tabela 3.3 Valores de radionuclídeos (fonte: EDM, 2007)

Referência da amostra	^{226}Ra (Bq/l)	U total (p.p.b.)
FXSW1 (12-2004)	0.04	<10
FXSW2 (04-2007)	0.23 ± 0.03	39 ± 5.9
FXSW5 (05-2007)	0.73 ± 0.11	13 ± 1.9

- **Nascente dos agriões (FXSW1)**

A nascente dos agriões localiza-se no aluvião da ribeira de Ludares e no limite Oeste da escombreira (figura 3.10a). Esta nascente foi monitorizada pelo Instituto de Tecnologia Nuclear (ITN) na época de 1976-1983, o que coincidiu com o período de laboração da mina. A água desta nascente flui para um poço localizado no limite Oeste da mesma, a nascente e o poço apenas se separam por um pequeno muro de pedras. Este poço tem a particularidade de nele crescerem agriões selvagens (figura 3.10b). Os agriões são um sinal de contaminação por radionuclídeos daí a importância da monitorização desta nascente. As águas desta nascente são utilizadas para a rega dos terrenos adjacentes.



Figura 3.10 a) Nascente dos agriões; b) Poço dos agriões

- **Poço mestre (FXSW2)**

As águas que se encontram no poço mestre provêm de uma nascente localizada a jusante da escombreira (figura 3.11).

Apresenta uma estrutura irregular, e onde a água se localiza a aproximadamente 20 metros da superfície, sendo por vezes difícil a recolha de água neste local. Juntamente com o poço localizado no “céu-aberto”, é o local onde se verificam os valores mais elevados de radionuclídeos e do elemento ferro, a sua água apresenta impurezas e um cheiro intenso.



Figura 3.11 Poço mestre

- **Poço construído no “céu-aberto” (FXSW5)**

Este poço localiza-se no limite do antigo “céu-aberto”, figura 3.12. Apresenta uma típica água de mina, com espuma, tonalidade amarelada e cheiro intenso. A água deste poço, provem da mina, o poço mestre e o poço do “céu-aberto” estão em comunicação.

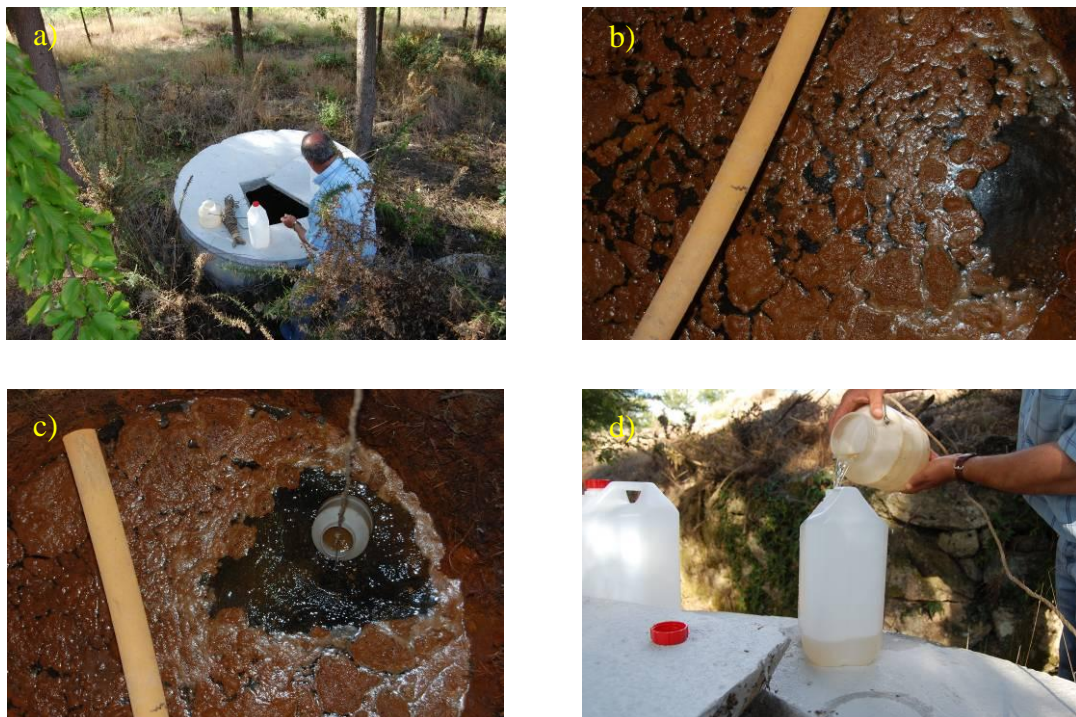


Figura 3.12 Poço construído no “céu-aberto” A – Enquadramento do poço; B e C – Aspecto da típica água de mina; D – Exemplo de uma amostragem de água onde se pode observar a tonalidade da água.

Existe um pequeno poço, localizado no “céu-aberto”, que recolhe a água excedente de um poço que se encontra num terreno privado, junto à antiga escola primária (figura 3.13).



Figura 3.13 Enquadramento do poço que recolhe água excedente, localizado no antigo “céu-aberto”

O abastecimento público pode ser feito recorrendo a duas formas, águas superficiais, em geral albufeiras, e águas subterrâneas, esta última fonte é mais comum em abastecimentos locais ou regionais. Em geral, as águas subterrâneas apresentam uma

qualidade superior às águas superficiais, devido à menor vulnerabilidade das mesmas, no entanto os níveis de radionuclídeos em solução são mais elevados do que nas águas superficiais, excedendo por vezes os limites recomendáveis. Este facto é o resultado da interacção hidroquímica das rochas envolventes com o aquífero. Nem todas as captações do país são controladas no que respeita à qualidade radiológica (Oliveira, 2006). São vários os radioisótopos que podem ser ingeridos através da água para consumo, entre eles o mais importante devido à rádio-toxicidade é o ^{226}Ra .

4 METODOLOGIA DA ANÁLISE DE RISCO

4.1 Radioactividade

4.1.1 Introdução

A radioactividade é a propriedade pela qual certos átomos com núcleos instáveis (radioisótopos) se transformam espontaneamente em átomos mais estáveis (Davis & Cornwell, 1998). Estas transformações são acompanhadas pela emissão de partículas ou energia electromagnética. As transformações continuam até ser atingida uma configuração estável. Por exemplo, o ^{238}U é um átomo instável que desenvolve sucessivas modificações radioactivas até se transformar num átomo estável de ^{206}Pb . Esta transição envolve 14 etapas intermédias de decaimento com libertação de energia ou radiação sob a forma de partículas α (alfa) e β (beta) e radiação electromagnética raios γ (gama). Cada um dos 14 elementos de transição é chamado de descendente na série de decaimento. Existem esquemas de decaimento similares para outros radioisótopos, tais como por exemplo, o ^{232}Th e o ^{235}U .

Todos os radioisótopos desenvolvem processos de decaimento com taxas bem definidas. O intervalo de tempo necessário para que metade dos átomos se transforme é designado por semi-vida. Os tempos de semi-vida são variáveis, desde menos de um segundo (o ^{214}Po é 0,00016 segundos) até biliões de anos (o ^{238}U é 4,47 biliões de anos).

Existem muitos elementos radioactivos na crosta terrestre. Entre estes contam-se o ^{238}U , o ^{232}Th e o ^{235}U e os seus descendentes. Estes radioisótopos exibem decaimento permanente até atingirem o final da série, ou seja, atingirem um átomo estável. Todavia, baseado nos tempos de semi-vida, a transformação destes elementos é medida em biliões de anos. Por exemplo, o ^{238}U demorará aproximadamente 4,5 biliões de anos para que metade dos átomos ainda existentes na crosta terrestre se transforme em ^{234}Th e demorará mais 4,5 biliões de anos para que a metade restante se transforme novamente, e assim sucessivamente. Face aos tempos de semi-vida, os átomos de ^{238}U , ^{232}Th , e ^{235}U vão permanecer na crosta terrestre à escala da vida Humana.

Todos os organismos vivos estão constantemente expostos à radiação proveniente dos elementos radioactivos presentes na crosta e, ainda, às radiações provenientes do espaço. Esta radiação é referida como radiação natural. No último século surgiram

outros isótopos com origem antrópica. Também começaram a ser explorados e concentrados os elementos radioactivos que anteriormente ocorriam de forma natural, e começaram a surgir utilizações (bombas, aplicações médicas, etc.) que alteraram local ou globalmente os valores da radiação natural.

Cada indivíduo contém sempre no seu organismo material radioactivo, que é proveniente dos alimentos, da água e do ar. Alguns tecidos e organismos acumulam materiais radioactivos. Por exemplo, o ^{131}I tende a acumular-se na tiróide e o ^{226}Ra nos ossos.

Os níveis de radiação natural acompanham a heterogeneidade dos elementos radioactivos na crosta terrestre. Os minérios radioactivos, concentrados em locais específicos da crosta terrestre, variam bastante no conteúdo de elementos radioactivos. Também, os depósitos minerais podem estar próximo da superfície ou algumas dezenas ou centenas de metros de profundidade.

4.1.2 Séries radioactivas

Na natureza existem diversas famílias de elementos radioactivos mas as mais importantes, pelos seus descendentes e período de semi-vida, são apenas quatro, todas independentes entre si. Quase todos os elementos das séries de decaimento são ainda hoje encontrados na natureza, à excepção do neptúnio, cujo tempo de semi-vida é inferior à idade da Terra, o que fez com que todo o neptúnio existente já tenha decaído (tabela 4.2). Os restantes radioisótopos, pelo facto de apresentarem um período de semi-vida superior à idade da Terra, são por isso considerados, juntamente com o ^{226}Ra , radioisótopos primordiais, constituem uma boa ferramenta para a datação das rochas e consequentemente da idade da terra.

Tabela 4.1 Características das séries de desintegração de 4 elementos

Nome da série	Núcleo final estável	Núcleos originais	Semi-vida (anos)
Tório	^{208}Pb	^{232}Th	$1,41 \times 10^{10}$
Neptúnio	^{209}Bi	^{237}Np	$2,14 \times 10^6$
Urânio	^{206}Pb	^{238}U	$4,47 \times 10^9$
Actínio	^{207}Pb	^{235}U	$7,04 \times 10^8$

Nas figuras 4.1 a 4.3 apresentam-se as séries de decaimento dos três radioisótopos ainda presentes na natureza, ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , respectivamente.

I) Série de decaimento do Rádio-Urânio 238

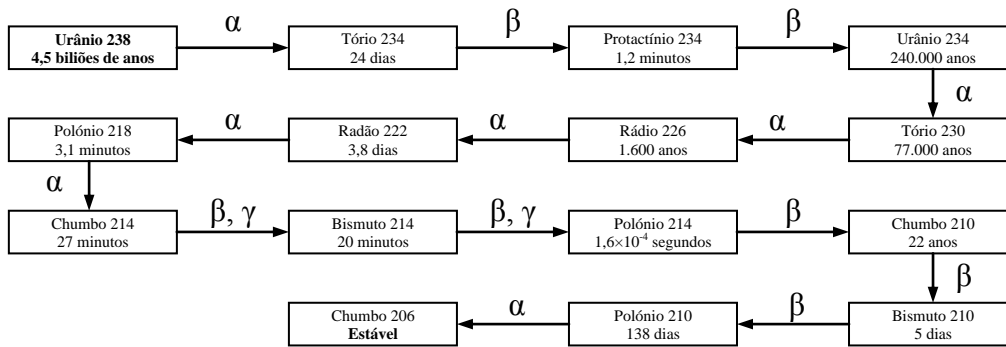


Figura 4.1 Série de desintegração do ^{238}U (fonte: Human Health Fact Sheet)

A série de desintegração inicia-se no urânio ^{238}U , passa pelo rádio, ^{226}Ra , e pelo radão, culminando no chumbo radiogênico estável ^{206}Pb (rádio G). Ocorre libertação de hélio.

Devido ao elevado período de semi-vida do ^{238}U existe uma correspondência entre este e o ^{234}Th , deste modo o ^{234}Th é muitas vezes analisado em vez do ^{238}U mas as conclusões analíticas são as mesmas.

II) Série de decaimento do Urânio 235

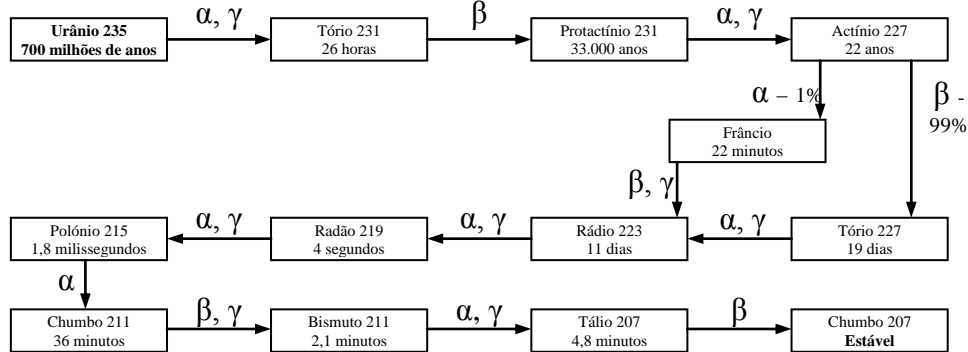


Figura 4.2 Série de desintegração do ^{235}U (fonte: Human Health Fact Sheet)

A série de desintegração inicia-se no actino-urânio, ^{235}U , passa pelo protactínio, ^{231}Pa , e pelo actínio, ^{227}Ac , terminando no chumbo radiogênico estável, ^{207}Pb (actínio D). Também ocorre a libertação de hélio.

III) Série de decaimento do Tório 232

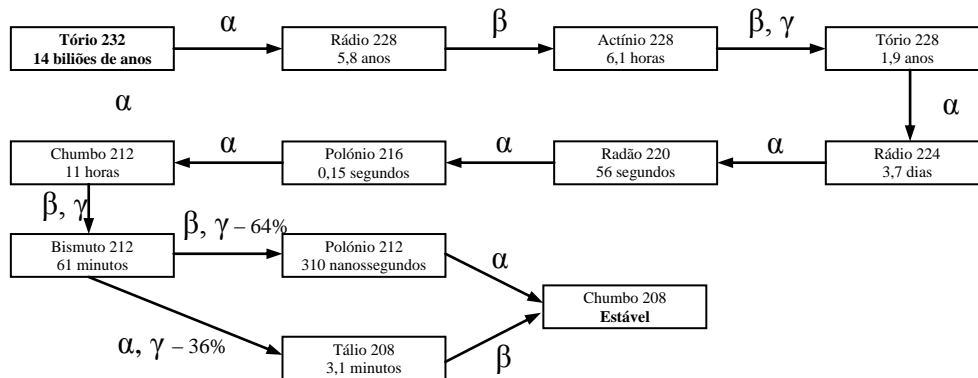


Figura 4.3 Série de desintegração do ^{232}Th (fonte: Human Health Fact Sheet)

A série do tório inicia-se com a desintegração do ^{232}Th terminando no chumbo estável ^{208}Pb . Ao mesmo tempo origina-se hélio, resultante da emissão de raios alfa.

Para além destes elementos radioactivos existem outros que, embora de menor importância, também ocorrem na natureza. Entre eles contam-se o potássio (^{40}K), que decai para cálcio (^{40}Ca , com emissão de raios β) o árgon (^{40}Ar , pela captura de um electrão); o rubídio (^{87}Rb) que se transforma em estrôncio (^{87}Sr , pela emissão de raios β); o isótopo ^{176}Lu do lutécio, decompõem-se em háfnio, (^{176}Hf pela emissão de raios β), e em itérbio (^{176}Yb , por captura electrónica); o samário (^{152}Sm) decai para neodímio (^{152}Nd , pela emissão de raios β); o rénio (^{187}Re) decai para ósmio (^{187}Os , pela emissão de raios β); o cloro radioactivo (^{36}Cl) provém do cloro 35 (por acção dos neutrões dos raios cósmicos); e o carbono (^{14}C) decai para azoto (^{14}N por emissão de raios β).

4.1.3 Tipos de radiação

As radiações são consideradas, ondas electromagnéticas, ou partículas que se propagam com determinada velocidade. Apresentam energia, carga eléctrica e magnética, variável, que pode ir desde valores pequenos até valores muito elevados (Davis & Cornwell, 1998).

Os três tipos de radiação emitida pelas substâncias radioactivas são:

- Radiação alfa (α): são fluxos de partículas carregadas positivamente, compostas por 2 neutrões e 2 prótons (núcleo de hélio), cuja massa é quatro vezes a de um átomo de hidrogénio. São desviadas por campos eléctricos e magnéticos, perdendo a sua energia essencialmente por ionização e excitação. São muito ionizantes porém pouco penetrantes (7 mg/cm^2 abaixo da superfície da pele). Não penetra a pele, podendo ser bloqueada apenas por uma folha de papel, no entanto é perigosa para os pulmões. O seu percurso no ar não excede os 5 cm. A inalação ou ingestão deste tipo de partículas é muito perigosa, dado que provocam danos nos tecidos vivos.
- Radiação beta (β): são fluxos de partículas originárias do núcleo, o que as distingue dos electrões (as partículas tem apenas $1/1.838$ da massa do átomo de hidrogénio). Possuem carga eléctrica negativa. É mais penetrante, porém menos ionizante, do que a radiação alfa. Pode penetrar no corpo mas pode ser bloqueado com uma placa de alumínio.
- Radiação gama (γ): são ondas electromagnéticas. É o tipo mais penetrante de radiação, porem o seu poder ionizante é baixo. Não apresenta carga eléctrica nem massa, podendo percorrer grandes distâncias sem sofrer interacções. Podem ser produzidos três processos, através da interacção da radiação electromagnética ionizante com a matéria, são eles, o efeito fotoeléctrico, efeito de Compton e produção de Pares. Ao receber este tipo de radiação o material genético dos seres vivos pode ser alterado, originando deficiências nos genes. Atravessa o corpo e vários centímetros de chumbo ou um metro de água.

Em suma, cada tipo de radiação tem as suas próprias características. Quanto maior for a energia da radiação, maior será o número de interacções que essa radiação é capaz de produzir, no entanto esta energia vai diminuindo continuamente.

4.1.4 Principais Impactes do Urânio e Respective Minérios no Ser Humano

A exposição a radiações ionizantes, provenientes do decaimento do urânio, origina envenenamento de baixa intensidade por inalação, ou absorção pela pele. O seu efeito no organismo é cumulativo, o que significa que o mineral, por não ser reconhecido pelo

ser vivo, não é eliminado, sendo paulatinamente depositado, sobretudo nos ossos, e a radiação assim exposta pode provocar o desenvolvimento de cancros.

Os trabalhadores das minas de urânio constituem o grupo de pessoas onde as consequências devido à exposição do urânio são mais visíveis, pois as doses de radiação a que estão sujeitos são maiores.

Os principais problemas para os mineiros são a inalação de poeiras tóxicas e do gás radioactivo radão, que provocam entre outras doenças pulmonares o cancro do pulmão (a forma mais comum nos mineiros e que pode levar mais de 20 anos a manifestar-se). Também, devido à dispersão das poeiras e presença do radão as populações locais podem ser afectadas.

A zona onde se localiza a escombreira e sua envolvente imediata actualmente existente é a mais preocupante de toda a área mineira, cujas razões se relacionam não só com o tempo durante o qual os resíduos actuam, como com o tipo de isótopos radioactivos que a compõem.

4.1.5 Medição da radioactividade

A **radioactividade** é quantificada em número de desintegrações por unidade de tempo; por exemplo, por segundo será *dps*. Os equipamentos de medida registam esta taxa em choques por unidade de tempo; por exemplo, por segundo, *cps*. Estas duas grandezas são equivalentes. Se o instrumento de contagem for 100% eficiente, e a radiação de fundo for desprezável, então a medição dos choques por unidade de tempo será igual ao número de desintegrações reais. Caso contrário, o número de choques medido será sempre menor do que as desintegrações reais.

A unidade tradicional de medida da radioactividade é o curie (Ci), que corresponde ao número de desintegrações observadas numa amostra de referência de 1 grama de rádio. A unidade SI da radioactividade é o Becquerel (Bq) que corresponde à quantidade de material que desenvolve uma desintegração por segundo. Um curie de material radioactivo tem 37 biliões de desintegrações por segundo, ou seja, 37×10^9 Bq ou 37 GBq. A tabela 4.1 mostra a radioactividade de algumas substâncias.

Tabela 4.2 Radioactividade de algumas substâncias

Substância	Radioactividade
1 ser humano adulto (100 Bq/kg)	7.000 Bq
O ar numa habitação com 100 m ² na Austrália (radão)	3.000 Bq
O ar em muitas habitações com 100 m ² na Europa (radão)	30.000 Bq
1 detector de incêndios (com amerício)	30.000 Bq
Radioisótopo para diagnóstico médico	70 milhões de Bq
Radioisótopo para terapia médica	100.000.000 milhões de Bq
1 kg de minério de urânio (15%)	25 milhões de Bq
1 kg de minério de urânio (0,3%)	500.000 Bq
1 kg de granito	1.000 Bq

4.1.6 A Dose

As radiações ionizantes podem ser absorvidas de diferentes formas pelo ser humano. À quantidade de energia depositada na matéria dá-se o nome de **dose absorvida**, D (Davis & Cornwell, 1998). Pode definir-se como a energia absorvida dE , proveniente de qualquer tipo de radiação, por unidade de massa do material absorvente dm .

$$D = dE / dm \quad (1)$$

A unidade SI é o gray (Gy) e corresponde à absorção de um joule por um quilograma de material.

Para ter em conta as diferenças relativas ao tipo de radiação e capacidade ionizante foi introduzido o conceito de **dose equivalente**, H , que é calculado pela ponderação da dose média absorvida por um organismo ou tecido vivo por um factor adimensional Q . A unidade SI da dose equivalente é o sievert (Sv).

$$H = D \times Q \quad (2)$$

A dose equivalente é igual à dose absorvida, quando se considera a radiação γ e β ; para a radiação α , a dose equivalente é da ordem de 20 vezes a dose absorvida.

Define-se ainda o conceito de **dose efectiva**, E , também expressa em Sv, para tomar em conta que os efeitos das radiações ionizantes sobre um tecido vivo são imprevisíveis, dependendo da natureza dos tecidos expostos e do tipo de radiação. Este conceito

Com: A – radiação gama; t_1 – tempo de permanência no interior dos edifícios; t_2 – tempo no exterior; B – torão; $C_{1,2}$ – radão; D – poeiras; d – taxa de inalação; U – concentração de urânio; Ra – concentração de rádio; b_1, \dots, b_i consumo anual de água e alimentos.

No presente trabalho, para o cálculo da dose efectiva, considerou-se apenas o primeiro termo da equação 3 (radiação externa para um tempo t_1) dado que não foram feitas medições no interior dos edifícios para aferição da componente inalação de ar nem foram consideradas a ingestão de água ou alimentos.

Em média, o Homem recebe uma dose de radiação ionizante que se estima em cerca de 2,7 mSv/ano (Neves e Pereira, 2004); destes 2,4 correspondem a fontes naturais, assim distribuídos: a) radiação cósmica – 16,25%; b) radiação externa terrestre – 20%; c) inalação – 52,5%; d) 11,25% – ingestão.

Em Portugal não estão definidos limites da dose efectiva, no entanto todas as organizações internacionais que intervêm na definição dos limites da dose defendem que, tendo em conta factores sociais e económicos, a mesma não deve ser tão baixa quanto a razoavelmente atingível.

De acordo com a *Internacional Atomic Energy Agency* em 1995, IAEA, assim como a Directiva Comunitária nº 96/29 (Comissão Europeia, 1996), para ao grupo crítico do público, a dose efectiva não deve exceder 1 mSv/ano, relativamente ao fundo natural, e só em circunstâncias especiais se pode admitir uma dose efectiva até 5 mSv de valor acumulado. O *Internacional Commission on Radiological Protection* (ICRP) é mais restritivo e, em 1998, recomendou o valor de 0,3 mSv.

Para um trabalhador, a dose ocupacional recomendada é de 20 mSv/ano, podendo ser superior até 50 mSv num ano, desde que não se exceda os 100 mSv num período de 5 anos.

Em Portugal, o Decreto Regulamentar nº 34/92 regulamenta em matéria específica de segurança e protecção radiológica as actividades de pesquisa, reconhecimento, e exploração de depósitos de urânio, instalação e utilização de todos os correspondentes anexos mineiros onde não se trate como produto principal, mas onde se possam encontrar produtos de filiação do radão ou do torão em suspensão no ar e transporte de minério de urânio.

4.2 Radão

O **radão** é um gás radioactivo, incolor e inodoro, nas condições normais de pressão e temperatura, que se forma no seio das rochas, materiais de construção, solo, ar e água (Davis & Cornwell, 1998).

Apresenta três isótopos principais, gerados nas cadeias de decaimento de ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , os quais se designam, respectivamente, por radão (^{222}Rn), actinão (^{219}Rn) e torão (^{220}Rn), com semi-vidas de 3,8 dias, 55s e 4s. O único isótopo com mobilidade significativa nos sistemas geológicos, devido à sua mais extensa semi-vida, é o ^{222}Rn , que tem o mesmo nome que o elemento químico (Neves e Pereira, 2004).

O radão é o mais denso dos gases conhecidos (densidade = 9,73). É solúvel na água e em solventes orgânicos.

Por ser um gás monoatômico é muito penetrante e apresenta elevada mobilidade nos fluidos. Mediante o processo de difusão, entra na constituição da atmosfera com os seus descendentes, sobre as moléculas e partículas ultramicroscópicas.

Está presente no ar que se respira, não sendo detectável pelos sentidos humanos, logo o risco a ele associado é de difícil percepção. A ascensão do radão à superfície (emanação) é condicionada pela permeabilidade e porosidade das rochas e dos solos, nomeadamente o grau de fracturação.

Ainda segundo Neves e Pereira (2004), embora não sendo os únicos, a constituição litológica duma região, o teor em urânio nas suas rochas, a permeabilidade, e o suporte mineralógico do urânio, são factores que determinam a concentração do radão nos solos e conseqüentemente, do potencial de transmissão deste gás ao ar no interior de espaços confinados, designadamente as habitações. Os níveis mais elevados ocorrem nas rochas graníticas (plutónicas) e são mais baixos nas rochas sedimentares.

Tendo em conta que o risco de exposição deste gás ocorre fundamentalmente a partir do solo, o radão infiltra-se nas casas através de fissuras nos pavimentos, fendas nas paredes e fundações, juntas de construção ou espaços não preenchidos na base das edificações, atingindo concentrações elevadas, superiores às que ocorrem no exterior das habitações. Em geral concentra-se no ar dos pisos inferiores, em caves e rés-do-chão, onde em geral

a ventilação é deficiente. Estima-se que 95% do radão presente numa habitação seja proveniente do subsolo (onde as concentrações deste gás são em geral muito elevadas) e 5% dos materiais de construção.

De acordo com a legislação em vigor, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 79/2006, que regula a certificação energética dos edifícios, o valor máximo admissível é de 400 Bq.m⁻³. Em Portugal as concentrações deste gás são maiores na região Centro do país, nomeadamente na Guarda, que apresenta valores na ordem dos 120 Bq.m⁻³, seguido de Viseu com 100 Bq.m⁻³. Este facto é explicado pelo substrato predominantemente granítico (figura 4.4).

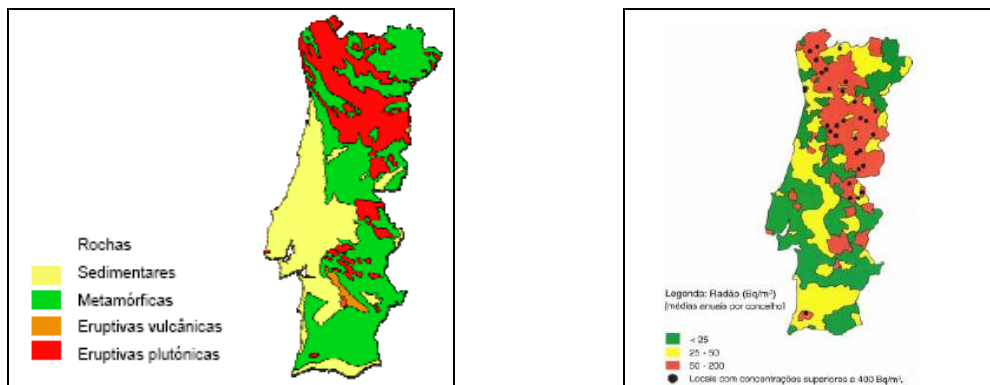


Figura 4.5 Mapa simplificado das principais litologias em Portugal e concentrações de radão (fonte: Oliveira, 2006)

Os parâmetros atmosféricos, tais como a pressão atmosférica, a humidade dos solos e a temperatura, também influenciam as concentrações de radão. Os níveis de radão são mais elevados no Verão do que no Inverno, inclusive podem-se verificar variações diárias e sazonais deste gás (figura 4.5).

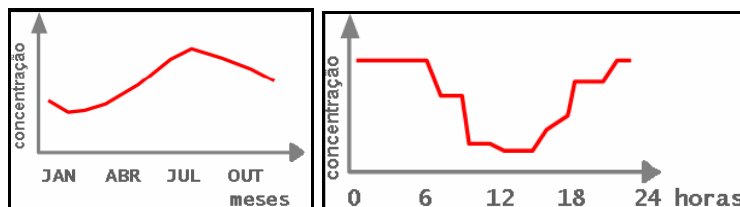


Figura 4.6 Variação das concentrações de radão no ar exterior: A – variação anual no hemisfério norte; B – variação diária. (fonte: Oliveira, 2006)

O radão, e os seus descendentes, introduzem-se nos pulmões através das vias respiratórias, aí se fixando com os isótopos de polónio, chumbo e bismuto gerados por decaimento sucessivo, com a consequente emissão de radiação ionizante. Tendo estes isótopos períodos de semi-vida que não excedem alguns minutos, produz-se uma irradiação contínua dos tecidos pulmonares em reduzido intervalo de tempo, até ser atingida a forma final estável de ^{206}Pb . Segundo a Agência de Protecção Ambiental dos EUA (EPA), entre 1 a 2 em cada 100 pessoas que durante a vida inalem ar com concentrações de radão superiores a 150 Bq.m^{-3} , correm o risco de contrair cancro do pulmão (Krane e Raymond, *in* Oliveira 2006).

O ser humano está exposto ao radão de duas formas; através da inalação do gás e descendentes, ou por ingestão, através do consumo de água, na qual o radão se encontra dissolvido. Apesar desta última ser menos importante, relativamente à inalação, não deve ser desprezada, especialmente se as águas utilizadas para o consumo humano contiverem valores elevados de radão e seus descendentes. Segundo a Recomendação Europeia (2001/928/Euratom) o valor máximo para o radão na água é de 1000 Bq/l.

4.3 Enquadramento da metodologia da análise de risco

Os impactes ambientais das operações mineiras, na fase de pós-encerramento a longo prazo, dependem fundamentalmente do tipo de exploração (“céu-aberto”, subterrâneo ou misto), minérios, localização e infra-estruturas e das medidas que foram adoptadas na fase de encerramento.

A Mina da Freixiosa é uma antiga mina de minérios de urânio onde existiram 3 infra-estruturas chave: os trabalhos subterrâneos, o “céu-aberto” e uma escombreira.

No que se refere aos trabalhos subterrâneos, logo após o encerramento foram retirados para a superfície os equipamentos, fez-se o enchimento das galerias com enchimento hidráulico e selaram-se os acessos. A retirada dos equipamentos foi preventiva no que respeita à contaminação por hidrocarbonetos. O enchimento das galerias e chaminés permitiu que não se desenvolvessem subsidências no local.

No caso do “céu-aberto” fez-se a modelação do terreno com escombros de baixo teor em minérios radioactivos e foi colocada uma camada de terra vegetal. Actualmente é uma

área que exhibe vegetação rasteira. Esta prática impôs algumas limitações ao uso futuro do local, por exemplo, não é recomendado para utilização agrícola dada a possível bioacumulação por metais residuais.

Os anteriores locais de exploração, o subterrâneo e o “céu-aberto”, podem afectar a qualidade da água superficial e subterrânea a longo prazo. As águas superficiais podem ainda ser contaminadas, a alguma distância, por poeiras com minérios radioactivos. Também, a qualidade do ar nos locais das antigas explorações pode ser afectada pelas poeiras e pelo gás radão que é libertado das mineralizações da rocha e transportado para a superfície mais facilmente pelos acessos mineiros.

A escombreira serviu para deposição da rocha proveniente do desenvolvimento e dos minérios muito pobres, abaixo do teor de corte (à data da exploração). Por estas razões, as preocupações ambientais são menores do que as que se teria se fosse uma barragem de rejeitados.

O risco pode ser definido como a combinação da probabilidade, ou frequência, de ocorrência de um evento perigoso ou uma falha e a magnitude das consequências da sua ocorrência. Neste contexto, a avaliação actual dos parâmetros radiológicos no local, vários anos após o encerramento da mina, constitui a caracterização ambiental do local, e o cruzamento com a actividade humana a análise de risco.

A ocorrência de eventos ou substâncias perigosas, à superfície ou no subsolo, não representa por si só um risco inaceitável, e podem não requerer necessariamente qualquer acção (Brito, 2005). O risco existe quando se observa uma ligação fonte – trajecto – alvo, sendo:

- A **fonte** é a origem do problema, que se pode localizar tanto à superfície como no subsolo;
- O **trajecto** é o caminho pelo qual se atinge um receptor a partir da fonte;
- Os **receptores** são os organismos vivos, os sistemas ecológicos ou os recursos económicos que podem ser prejudicados.

Na área da Mina da Freixiosa, as fontes potenciais de contaminantes são, à superfície, o antigo “céu-aberto” e a escombreira, onde foram depositados materiais com valores radiométricos elevados. No domínio subterrâneo, o principal problema são os minérios

in situ. Os receptores observados no local são os habitantes mais próximos, a fauna e a flora. Quanto aos trajectos consideram-se o meio rochoso fracturado, que permite a circulação dos lixiviados e do radão para a superfície, o ar, a água superficial e a água subterrânea. O risco existe apenas, quando coexistem os 3 elementos, fonte, trajecto e alvo. O risco associado à área da Freixiosa ocorre não só devido à existência de níveis radiométricos elevados, mas principalmente pela proximidade da antiga mina (fonte radiométrica) à povoação.

Esta metodologia, é denominada de modelo conceptual de contaminação e permite de uma forma simples avaliar a contaminação de terrenos (solos e águas subterrâneas) em áreas sujeitas a requalificação ambiental, razão pela qual foi escolhida para a análise risco deste caso de estudo.

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), e do ponto de vista conceptual, na selecção de áreas prioritárias de contaminação de minas abandonadas são considerados três grupos de indicadores específicos:

I) Potencial risco para a saúde do Homem (dimensão social)

O factor mais importante a ter em conta é a população exposta. Na maior parte das vezes as explorações mineiras desenvolvem-se em regiões com baixa densidade populacional, podendo ao longo da vida da mina crescer significativamente. As consequências na saúde estão geralmente associadas à água, quer por consumo directo quer por consumo de produtos agrícolas cultivados nas áreas envolventes e regados com águas da região. Também podem ser ingeridas ou inaladas poeiras de materiais rochosos da mina.

Sempre que há exploração mineira de minérios de urânio, além da potencial contaminação química, acresce a contaminação radiológica proveniente da exposição aos materiais radioactivos através do contacto próximo com as escombrelas, ou o uso destes materiais como agregados de construção.

Devem ser considerados os indicadores: (1) concentrações dos elementos químicos com efeitos tóxicos para a saúde Humana nas águas e solos, particularmente os de uso agrícola; (2) localização das explorações de água públicas ou particulares; (3) proximidade a povoações, pelo contacto directo com estes resíduos (4) tipo de infra-estruturas mineiras.

II) Potencial risco de continuação da degradação dos ecossistemas (dimensão ecológica)

Devem ser diagnosticados os factores abióticos dos ecossistemas como, por exemplo, o ar, solo, água superficial e subterrânea e determinar o risco de contaminação desses factores. A caracterização destes factores pode determinar zonas onde a fauna e a flora estejam em risco, resultando num potencial risco de contaminação/degradação dos ecossistemas. Por vezes, podem ocorrer situações em que o abandono da exploração é muito antigo e os ecossistemas, além de relativamente estabelecidos, possam ter dado lugar à existência de outras espécies de seres vivos perfeitamente adaptadas às condições do local. Nestes casos pode ser necessário salvaguardar o local pois a sua destruição representará perda de biodiversidade, no entanto é extremamente importante ponderar todos os factores que advêm do abandono da mina.

Consideram-se indicadores para preservação dos ecossistemas específicos nas áreas mineiras abandonadas: (1) existência de drenagem ácida, (2) o volume e a consolidação dos resíduos em escombrelas; (3) o regime hídrico da envolvente à exploração; (4) a antiguidade do abandono da exploração e (5) a presença em zona de reserva ou sítio classificado.

III) Potencial risco para a economia da região envolvente (dimensão económica)

Consideram-se os seguintes factores económicos, a ter em conta na selecção de indicadores de vulnerabilidade económica: (1) existência de reservas de minério nesse jazigo; (2) preservação do património mineiro para efeitos didácticos e de aproveitamento turístico, bem como a proximidade a áreas de turismo referenciadas; e (3) a existência a jusante da exploração mineira de infra-estruturas cujo investimento já foi efectivado e que são especialmente vulneráveis à poluição localizada ou difusa.

Neste ponto foi identificado a importância da análise de risco para a mina da Freixiosa, onde se observou a ligação entre a fonte-trajecto-alvo, deste modo tornou-se necessário definir uma metodologia para a respectiva análise, a qual vai ser descrita no capítulo seguinte.

4.4 Metodologia Adoptada para a Análise de Risco

4.4.1 Parâmetros Indicadores Radiológicos

Os parâmetros radiológicos avaliados pela EDM neste tipo de estudos são a radiometria de superfície, a radiação externa, a emissão de radão do solo, a energia potencial alfa dos gases radão e torão, e a concentração de diversos radionuclídeos (em particular o U^{238} , Ra^{226} e Pb^{210}) e parâmetros geoquímicos (como o As, Mo, Pb, Zn, entre outros) em solos, sedimentos de corrente, águas, vegetais e partículas. Estes indicadores foram aferidos no local da Mina da Freixiosa segundo um plano de amostragem previamente definido e que teve em conta linhas de água, poços, casas, estruturas mineralizadas, estradas e bermas, e locais considerados mais problemáticos.

De todos os parâmetros referidos, pelo seu carácter prático em termos de utilização e representatividade nos efeitos totais de radiação, a radiometria de superfície e a radiação externa são os mais usados. Na medição da radiometria de superfície e da radiação externa, o valor retirado corresponde ao da radiação gama que não é influenciado pelas condições atmosféricas.

Nos capítulos seguintes são apresentados os equipamentos utilizados nas 2 fases de medições, respectivamente para medir os parâmetros radiometria de superfície/radiação externa e emissão de radão, nas fontes de contaminação.

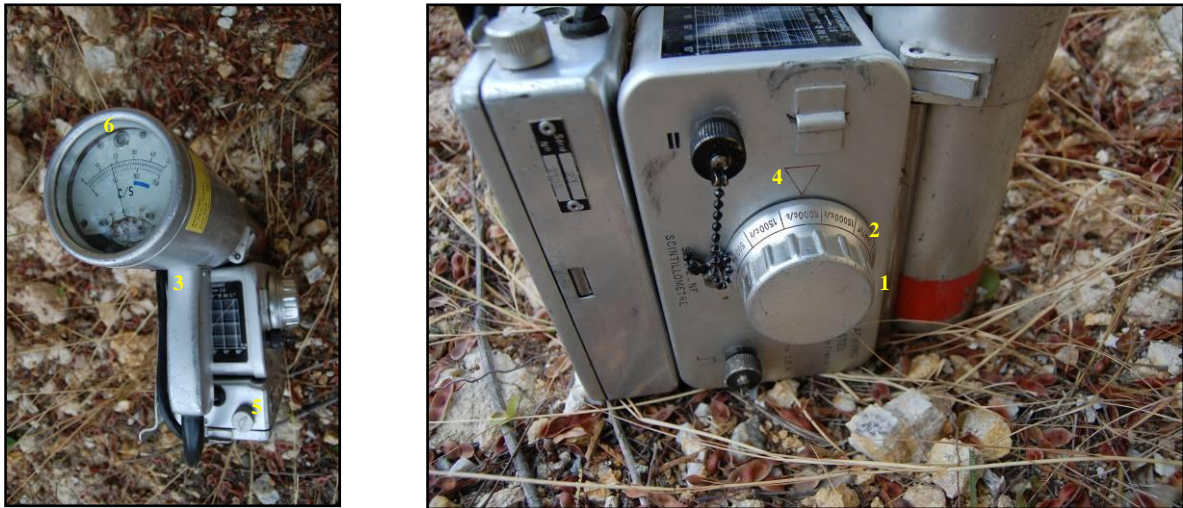
4.4.1.1 Cintilómetro de raios gama – SPP2

A radiometria de superfície foi medida com um cintilómetro portátil analógico, de raios gama, modelo SPP2 (figura 4.7), da marca “SAPHYMO STEL”. Este equipamento tem uma sonda externa, com um detector do tipo Geiger-Müller, que detecta e quantifica a radiação gama emitida pelo solo ou rocha. Uma das vantagens é fazer leituras a alguma distância do instrumento, possibilitando o alcance a locais de difícil acesso e/ou risco; outra das vantagens do equipamento é a robustez mesmo à água. O valor de cada medição é expressa em choques por segundo (cps).

Para se efectuar uma medição coloca-se a sonda junto ao local a avaliar e observa-se a leitura no visor. As medições são referentes ao período de um segundo.

O aparelho tem 5 escalas de leitura (150, 500, 1.500, 5.000 e 15.000 cps), que são seleccionadas, caso a caso, conforme a gama de valores a medir. A leitura máxima admissível do SPP2 é 15.000 cps. Normalmente iniciam-se as medições na escala mais baixa (150 cps), passando-se às escalas superiores para valores sucessivamente mais altos. Um sinal sonoro, que é regulável manualmente para o fundo natural, avisa o operador da existência de uma anomalia. No trabalho de campo levado a cabo neste estudo, a escala mais utilizada foi a de 1.500 cps (valores entre 500 e 1.500 cps).

O SPP2 é calibrado a intervalos de tempo não regulares, mas é verificado diariamente, ou com outra periodicidade, utilizando um padrão de radioactividade conhecida.



- 1 – Botão de ligar/desligar;
- 2 – Indicador de carga; para bom funcionamento a “agulha indicadora” tem que se situar dentro da barra azul, localizado no visor.
- 3 – Sonda que pode ser separada do equipamento, onde se faz a leitura da radioactividade;
- 4 – Escalas de leitura: 15.000 cps; 5.000 cps; 1.500 cps; 500 cps; 150 cps R (medição rápida utilizada nas campanhas de prospecção auto portada); 150 cps L (medição lenta);
- 5 – Emissão de sinal sonoro;
- 6 – Visor onde se efectuam as leituras.

Figura 4.7 Cintilómetro SPP2 para a medição da radiometria de superfície

O detector Geiger-Müller é constituído por um cilindro metálico, que no seu interior termina com uma mistura de hélio ou argón, e um eléctrodo positivo, o ânodo, que se encontra ligado a um circuito exterior (Vivolo, 2005). O invólucro metálico serve de eléctrodo a potencial zero (cátodo), ao qual é aplicada uma diferença de potencial (na ordem das centenas de volt), na interface do mesmo com o ânodo. A extremidade do cilindro é fechada (com uma película fina de material menos absorvente) de forma a

constituir a janela do detector; esta deve ficar em contacto com a fonte radioactiva de forma a detectar as partículas radioactivas.

Quando os gases são expostos à radiação ocorre ionização do gás, ou seja, um electrão é arrancado do átomo, transformando-o numa carga positiva. O electrão é atraído para o ânodo e o ião positivo para o cátodo. Ao longo deste processo, os electrões podem ganhar energia cinética suficiente para provocarem ionizações secundárias durante o trajecto ao ânodo. Um sinal eléctrico (tempo comum é de 2×10^{-4} s) é transmitido quando o eléctrodo positivo diminui de potencial devido ao contacto com os electrões, que só termina quando o ião atinge o cátodo, uma vez que a diferença de potencial é restabelecida. É este sinal que permite a detecção da radiação que atravessa o detector.

Um sistema completo de detecção Geiger-Müller (figura 4.8) é constituído pelo detector, uma fonte de alta tensão para polarizar o ânodo a um potencial conveniente e um sistema de contagem (Oliveira 2006).

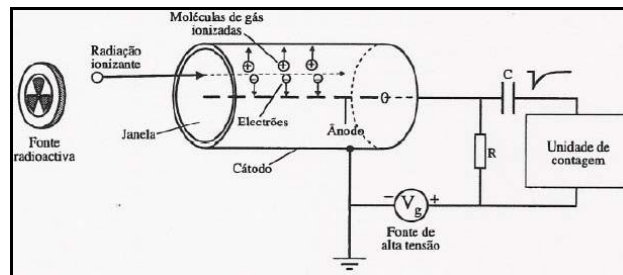


Figura 4.8 Esquema do detector Geiger-Müller (fonte: Oliveira, 2006)

4.4.1.2 Aparelho de medição da radiação externa

A radiação externa é medida utilizando um aparelho digital “Environmental meter, type 6-80 da marca Mini-Instruments, Burnham on Crouch, England”.

As radiações medidas são as gama, provenientes do solo, que por serem medidas através do aparelho de radiação externa permitem determinar a dose de radiação a que o ser humano fica exposto para um dado local, sendo por isso muito utilizado em estudos de impacte ambiental.

Não é aconselhável a sua utilização em condições climáticas agressivas, como temperaturas demasiado elevadas, ou tempo de chuva. O detector é colocado à altura de um metro acima do solo. A medida da radiação externa é um valor médio da radiação gama da área subjacente (figura 4.9).



Figura 4.9 Aparelho de medição da radiação externa

Os valores obtidos referem-se sempre a um intervalo de tempo. O tempo mínimo por leitura é de 10 segundos, mas pode subir até 30, 60, 100, 300, 600, 1000 e mais segundos. Quanto maior for o tempo de cada medição, mais elevado e preciso é o valor obtido; em geral as medições são realizadas para o intervalo de 100 segundos, tempo utilizado nas várias campanhas realizadas na área da mineira da Freixiosa.

As medições são expressas em choques. A fim de se obter o valor pretendido, ao valor obtido pelo aparelho, é necessário aplicar uma correcção, que tem em conta uma constante de calibração (no presente caso é de 13,74) e o intervalo de tempo utilizado para a leitura (Dt). Desta forma converte-se os choques em dose absorvida [$\mu\text{Gy}/h$], que é a unidade da radiação externa. A constante de calibração do aparelho é variável, o aparelho foi calibrado recentemente, em Abril de 2008, nos laboratórios do ITN.

$$Dose\ absorvida\ \mu\text{Gy}/h = \left(\frac{\text{choques}}{Dt} \right) / 13,74 \quad (4)$$

Os valores finais são sempre inferiores aos da radiometria de superfície mas podem ser correlacionados.

4.4.1.3 Medição do fluxo de radão exalado pelo solo

Para a medição do fluxo de radão foi utilizado equipamento ilustrado na figura 4.10, após instalação adequada.

Para se efectuar as medições do radão coloca-se uma caixa metálica, de acumulação, com dimensões 40×40×30 cm, sobre o local a medir, após limpar e desimpedir a área. Seguidamente selam-se as bordas da caixa com argila humidificada de forma a não permitir trocas de ar com o exterior. A caixa fica em acumulação durante 24 h.

Ao fim desse tempo medem-se os níveis de radão fazendo circular os gases da caixa por um aparelho digital, RTM2000, da marca SARAD. A ligação deste aparelho à caixa de radão faz-se através de dois tubos, uma para entrada e outro para saída de ar, que se conectam à caixa através de dois orifícios próprios.

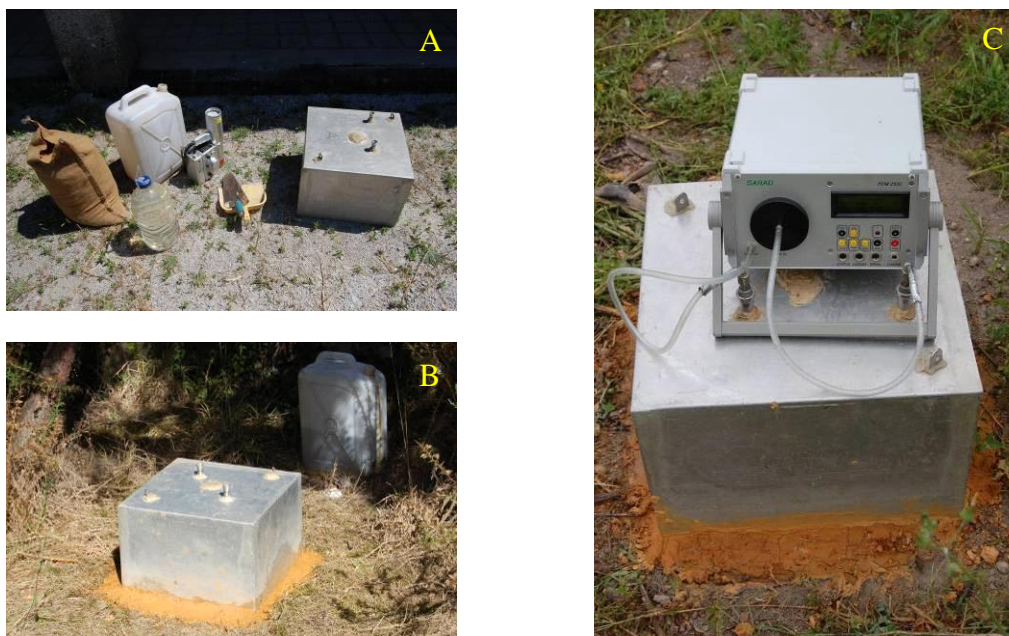


Figura 4.10 Medição do fluxo de radão: A – Exposição dos equipamentos; B – Instalação de uma caixa de medição e selagem da base com argila; C – Medição do fluxo um dia depois.

As leituras são feitas em duas séries de 10 minutos cada; ao fim de 20 minutos obtêm-se o valor final. Estes intervalos de tempo podem ser ajustados; no entanto, este período de tempo é o mais adequado para estas leituras, tendo em consideração o tempo de semi-vida do ^{218}Po (3,05 minutos), descendente directo do ^{222}Rn , avaliado nas medições

O aparelho permite avaliar as concentrações de torão e radão; este equipamento incorpora ainda, dispositivos de medição da pressão atmosférica, humidade e temperatura, factores que influenciam quer a concentração destes gases na atmosfera, quer a emissão a partir do solo.

Também se pode medir a concentração de radão directamente do ar, e neste caso a instalação do equipamento dispensa a caixa de acumulação.

O aparelho apresenta um erro relativo associado, que é expresso em percentagem; é obtido através da diferença entre o valor da taxa de exposição medida pelo instrumento e da taxa de exposição medida pela fonte utilizada no ensaio, dividido pela taxa de exposição da fonte. O erro máximo admissível deve ser inferior a $\pm 10\%$.

4.4.2 Análise Espacial e Estimação por Krigagem

A estimação por krigagem é um método geoestatístico que permite inferir os valores médios de uma variável no espaço não amostrado, a partir de um conjunto discreto de amostras (Isaaks & Srivastava, 1989; Soares, 2000).

A etapa inicial fundamental de qualquer estudo geoestatístico é a análise espacial da variável que se pretende estudar de forma que estes são decisivos para os resultados a atingir. As ferramentas mais utilizadas são o variograma e/ou a covariância espacial.

O variograma caracteriza a relação espacial da variável em função das distâncias entre os vários pontos amostrados. É calculado pela semi-soma do quadrado das diferenças entre os valores de todos os pares de pontos separados por um vector de distância h , segundo uma direcção específica. A expressão geral para o cálculo do variograma experimental é:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

Onde $N(h)$ é o número de pares de pontos separados de h e alinhados segundo a direcção do vector h

Os variogramas experimentais são calculados por direcções, com tolerâncias angulares máximas; se a tolerância angular for $\pm 90^\circ$ o variograma é calculado para todas as direcções e tem a designação de variograma omnidireccional.

O cálculo dos variogramas experimentais por direcção, para várias direcções em simultâneo, permite a análise e detecção de anisotropias, isto é comportamentos espaciais diferenciais por direcção. Se o comportamento dos variogramas for semelhante para todas as direcções diz-se que a variável em estudo é isótropa.

Aos variogramas experimentais, calculados para uma ou várias direcções, ajustam-se modelos teóricos para se obter uma função teórica média que interpole da melhor forma os pontos do variograma experimental. A melhor forma de ajustamento é quase sempre o ajustamento manual. Relembre-se que esta é a única etapa de um modelo geoestatístico onde se pode intervir decisivamente no modelo com o conhecimento pericial da variável.

Para ajustar os pontos do variograma é necessário utilizar funções adequadas que passem pelos pontos calculados do variograma experimental. Uma das limitações é que o modelo teórico seja sempre definido positivo.

Existem várias funções teóricas das quais as mais utilizadas têm a designação de modelo esférico (polinómio do 3º grau) ou modelo exponencial. Quaisquer umas destas funções dependem de 2 parâmetros: C – patamar e a – amplitude.

A amplitude quantifica a distância a partir da qual deixa de existir correlação entre os valores da variável, $Z(x)$. O patamar corresponde à ordenada onde os valores do variograma estabilizam. Se o variograma não exibir anisotropias zonais o patamar corresponde à variância dos dados.

Depois de ajustados os variogramas, por direcção ou global, pode-se passar à estimação por krigagem propriamente dita. A estimação permite quantificar o valor médio de uma variável por ponderação das amostras mais próximas em função da proximidade filtrada pela função variograma.

A expressão geral do estimador de krigagem da variável Z em cada ponto x_0 não amostrado traduz-se pela combinação linear das N amostras experimentais vizinhas do ponto x_0 :

$$[Z(x_0)^*] = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} \cdot Z(x_{\alpha}) \quad (6)$$

Onde λ_{α} são os ponderadores correspondentes a cada uma das amostras, calculados com base nos dois critérios da estimação por krigagem: condição de não enviesamento universal e variância mínima (Soares, 2000).

A componente experimental de geoestatística foi executada com o software geoMS (CMRP, 1998).

4.4.3 Desenvolvimento da metodologia

A caracterização da radioactividade ambiente na área da antiga Mina da Freixiosa envolveu as seguintes etapas e meios:

- Consulta de documentação relativa à área da antiga Mina da Freixiosa;
- Pesquisa e recolha de informação bibliográfica relacionada com o urânio e os depósitos minerais em Portugal;
- Recolha de informação referente à situação actual de referência no que se refere à geologia e aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos;
- Planeamento de trabalhos de campo com vista a fazer medições da radiometria de superfície, radiação externa e emissão de radão numa área mais extensa do que as anteriores campanhas desenvolvidas no local;
- Trabalho de campo na área de estudo com a medição de valores referentes à radiometria de superfície, radiação externa e emissão de radão. Estes trabalhos foram desenvolvidos entre Abril e Julho de 2008, ao longo de duas semanas intercaladas.
- Síntese dos resultados obtidos pela EDM nas anteriores campanhas de amostragem, 2004 e 2007 em áreas distintas, e principais conclusões;

- Análise estatística dos dados obtidos e elaboração de cartas de valores estimados por krigagem dos parâmetros recolhidos. Análise local da correlação entre as medições actuais, levadas a cabo durante este estudo, e as anteriores medições de radiometria de superfície e radiação externa.
- Interpretação das cartas obtidas por estimação para a radiometria de superfície e radiação externa, interpretação dos valores de emissão do radão e análise de risco do local.

O estudo prático de amostragem desenvolveu-se numa área com, aproximadamente, 1 km² (850×1104 m), incluindo todo o couto mineiro, envolvente e a povoação da Freixiosa. Não foram efectuadas medições no interior das habitações, mas apenas nos caminhos pedonais e de circulação automóvel.

Ao todo foram feitas 268 medições de radiometria de superfície e radiação externa (nos mesmos locais) e 16 medições de emissão de radão.

5 CARACTERIZAÇÃO DA RADIOACTIVIDADE AMBIENTE E ANÁLISE DE RISCO

5.1 Caracterização da Radioactividade Ambiente

5.1.1 Descrição das campanhas de amostragem

Em 2004 e 2007, a EDM realizou dois rastreios de pormenor de radiometria de superfície e radiação externa na área da antiga Mina da Freixiosa. Enquanto que em 2004 os estudos se centraram nas infra-estruturas da mina (escombreira e antigo “céu-aberto”), em 2007 os estudos abrangeram essencialmente as envolventes das infra-estruturas.

O compromisso de levar a cabo estas campanhas, de muito baixo espaçamento entre medições, permitiu o estudo em grande pormenor das áreas estudadas mas teve como consequência o de a área estudada ser muito restrita. Para complementar estas campanhas anteriores, foi proposta e realizada em 2008, no âmbito deste trabalho, uma campanha adicional de amostragem de menor densidade, mas espacialmente mais abrangente, para uma área aproximada de 1 km², incluindo parte da povoação da Freixiosa até ao limite da EN16.

O objectivo principal desta nova campanha é tentar quantificar e descrever a dispersão superficial das substâncias contaminantes radioactivas provenientes do antigo “céu-aberto”, escombreira e exploração subterrânea, para além da identificação de zonas anómalas, isto é zonas com elevados valores de radiometria.

A malha de amostragem é assim muito distinta entre as campanhas de 2004 e 2007 e a que foi levada a cabo em 2008. As principais diferenças relacionam-se com o espaçamento das medições, menor nas duas primeiras campanhas, 5×5 metros, podendo se considerar um levantamento de pormenor e maior na terceira campanha, 25×25 metros; igualmente, na campanha de 2008, a radiometria de superfície e radiação externa, foram amostradas nos mesmos locais o que em geral não acontece.

Nas figuras 5.1 e 5.2 mostram-se as malhas de amostragem, respectivamente, das campanhas de radiometria de superfície e radiação externa, para 2004, 2007 e 2008. Com base nos dados recolhidos de radiometria de superfície, efectuou-se uma nova campanha que até à data não se tinha realizado nesta área, que foi a de emissão de

radão. Por ser uma campanha muito morosa o número de pontos amostrados foi reduzido, e a malha de amostragem distribuiu-se essencialmente sobre o filão e zonas anómalas.

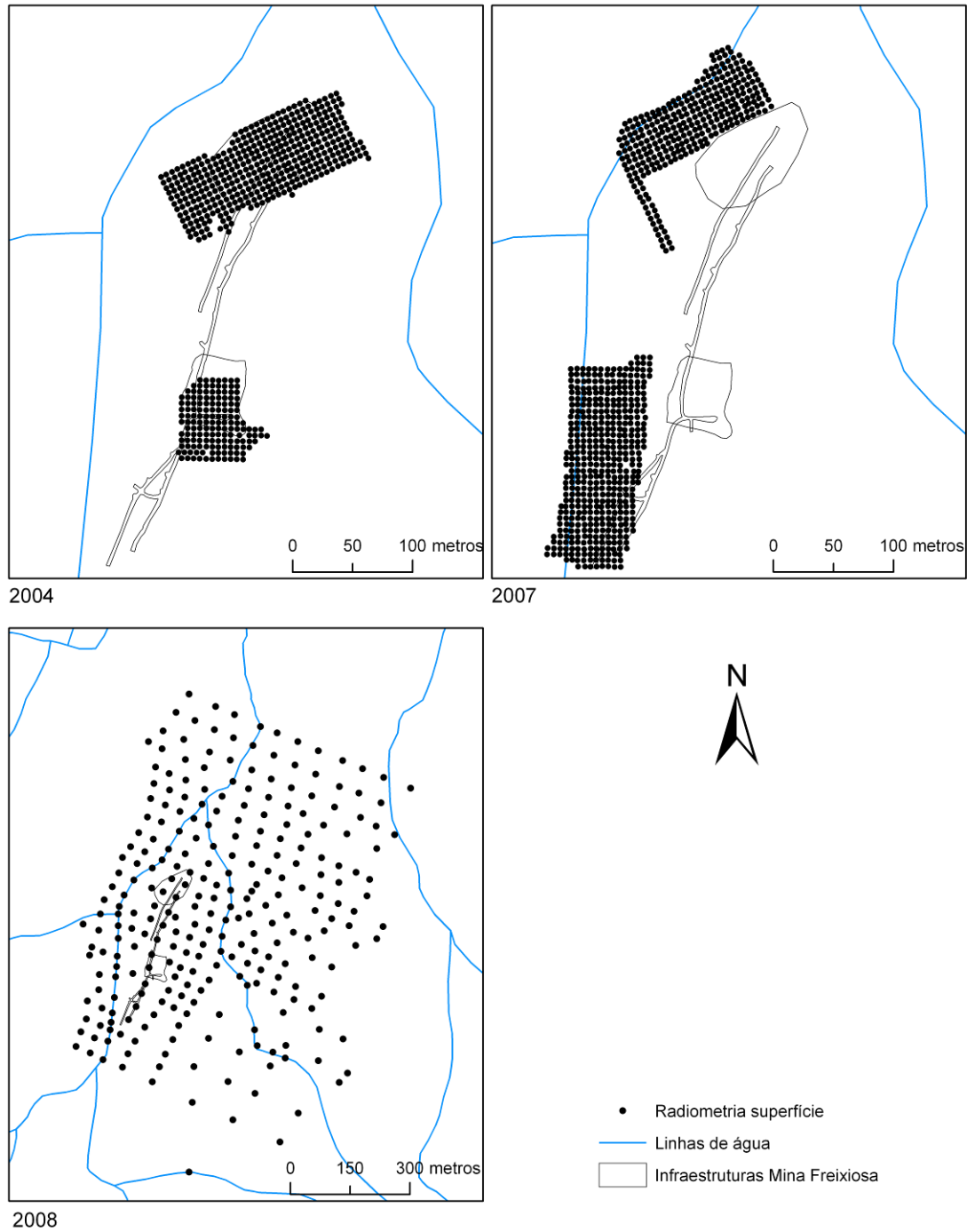


Figura 5.1 Malha de amostragem das campanhas de radiometria de superfície para os anos de 2004, 2007 e 2008.

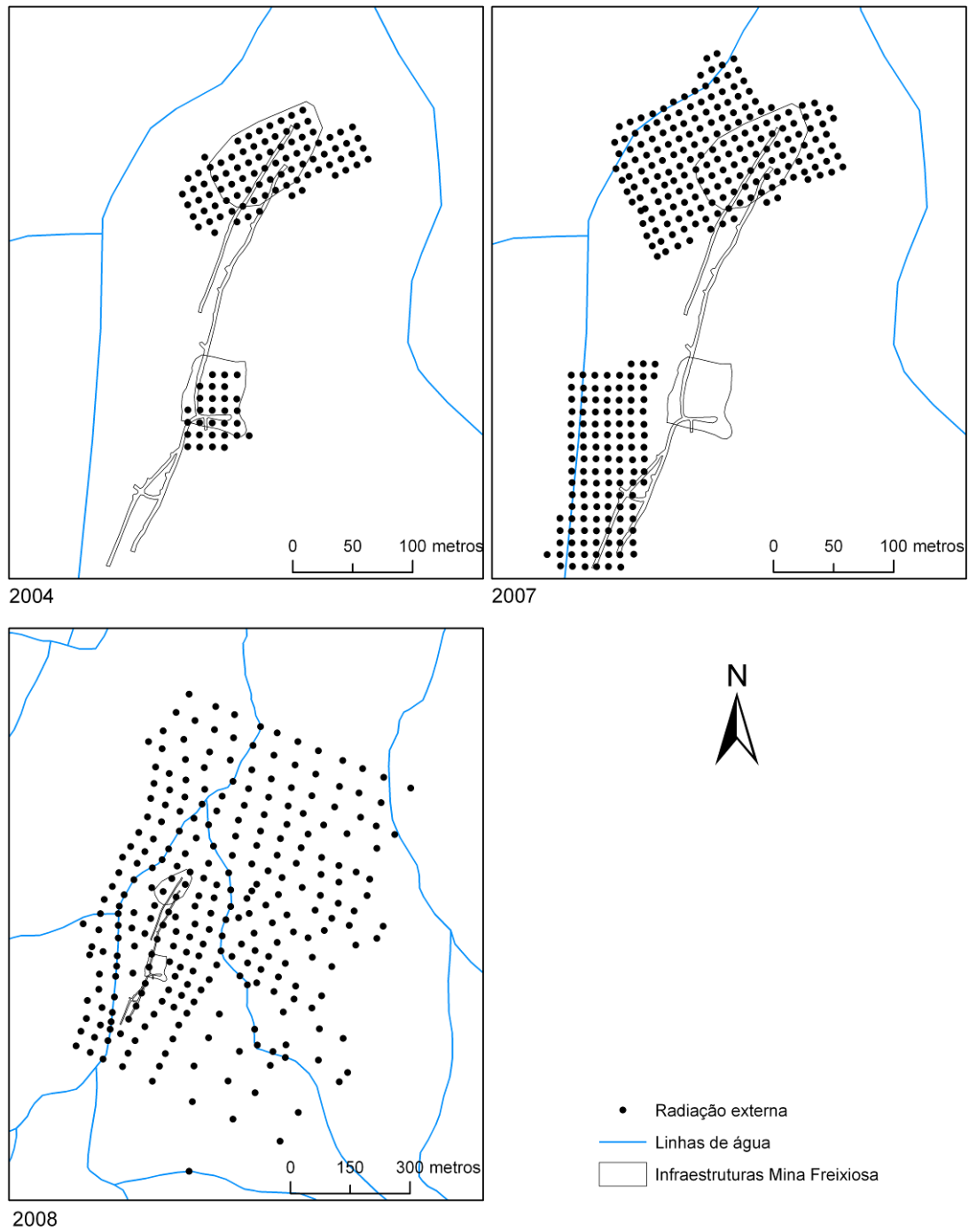


Figura 5.2 Malha de amostragem das campanhas de radiação externa para os anos 2004, 2007 e 2008.

Na análise dos resultados das campanhas de 2004 e 2007, os dados da área do antigo “céu-aberto” e escombreira foram sempre considerados separadamente por se tratarem de duas áreas com características muito distintas, tanto nas medições como na dispersão de contaminantes. Também a orientação das amostras é distinta, sentido SW-NE, para os pontos localizados na zona do “céu-aberto” e sentido N-S para os pontos localizados na escombreira.

Pelo seu carácter mais regional, todos os dados da campanha de 2008 foram analisados em simultâneo.

5.1.2 Radiometria de Superfície

A radiometria de superfície é utilizada para a detecção de anomalias localizadas (naturais ou antrópicas) como, por exemplo, na prospecção de jazigos de minérios radioactivos.

Nos períodos áureos do urânio, após a identificação de uma anomalia, realizava-se uma campanha de radiometria de pormenor segundo uma malha mais apertada, de forma a cartografar quais as áreas mais viáveis para a exploração do referido recurso. Pelo seu carácter muito expedito, as campanhas de radiometria de superfície são ainda muito utilizadas e, com objectivos ambientais, servem para fazer uma primeira delimitação das áreas de risco. Servem assim como ponto de partida para outras medições, nomeadamente, de radiação externa e emanação de radão.

5.1.2.1 Análise estatística

Os resultados obtidos da estatística univariada para a radiometria de superfície estão representados nas figuras 5.3 a 5.7, para os vários locais e campanhas.

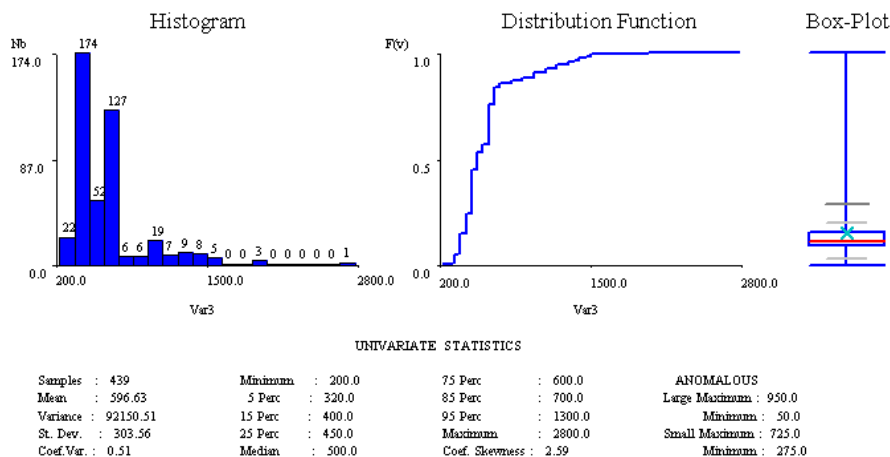


Figura 5.6 Estatísticos univariados para a envolvente da escombreira (2007)

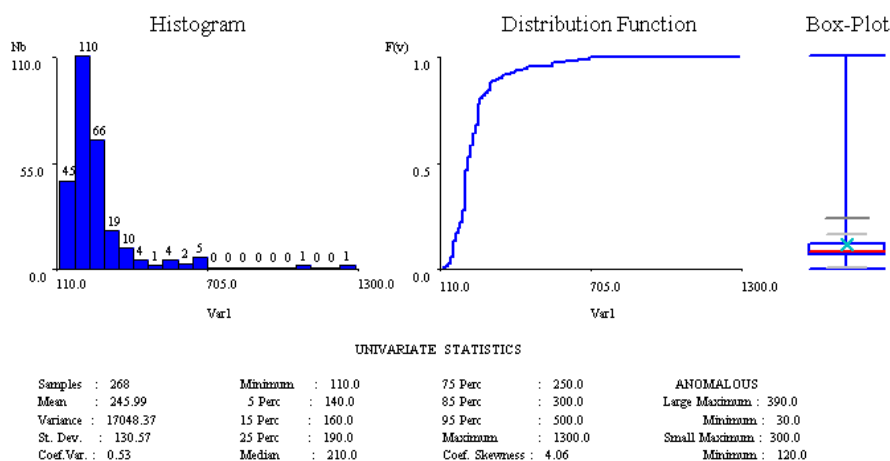


Figura 5.7 Estatísticos univariados para a área total (2008)

Na tabela 5.1 mostram-se os estatísticos de síntese das medições de radiometria de superfície, para as três campanhas, e por local.

Tabela 5.1 Dados estatísticos univariados para a radiometria de superfície

Campanha	Local	Média (cps)	Mediana (cps)	Desvio padrão (cps)	Máximo (cps)	Mínimo (cps)	Número de medições
2004	“Céu-aberto”	395,26	400	133,42	1.300	140	403
	Escombreira	909,33	750	636,21	4.100	300	149
2007	Envolvente do “céu-aberto”	483,15	450	102,93	650	350	276
	Envolvente da escombreira	596,63	500	303,56	2.500	200	439
2008	Área total	245,99	210	130,57	1.300	110	268

Da análise dos histogramas verifica-se que as medições seguem uma lei de distribuição assimétrica positiva, concentrando-se as medições para os valores mais baixos e as medições anómalas para os valores mais altos. A exceção é a envolvente do “céu-aberto” (2007) onde a população segue uma bi-distribuição.

Os valores mais elevados de radiometria de superfície são obtidos na zona da escombreira em 2004 (4100 cps), seguindo-se da respectiva envolvente em 2007 (2500 cps). Estas 2 zonas exibem também os dados estatísticos mais elevados (média, mediana e desvio padrão).

Por abranger uma área maior, onde os pontos são menos localizados nas zonas de eventuais anomalias, a campanha de 2008 compreende os dados estatísticos globalmente mais baixos (menor média, mediana e mínimo), muitos dos quais correspondentes ao fundo natural do local; apresenta o valor mais baixo registado, 110 cps.

As medições de radiometria de superfície nas campanhas de 2004 (Rsup2004) e 2007 (Rsup2007) com 2008 (Rsup2008) não são espacialmente coincidentes, mas referem-se a uma área só parcialmente comum. Para se correlacionarem estes valores, espacialmente não coincidentes, definiu-se uma tolerância máxima de 5 metros entre as medições e construíram-se os respectivos diagramas de dispersão (figuras 5.8 e 5.9). Os coeficientes de correlação obtidos permitem inferir sobre boa ou má correlação estatística entre os valores obtidos nas diferentes campanhas.

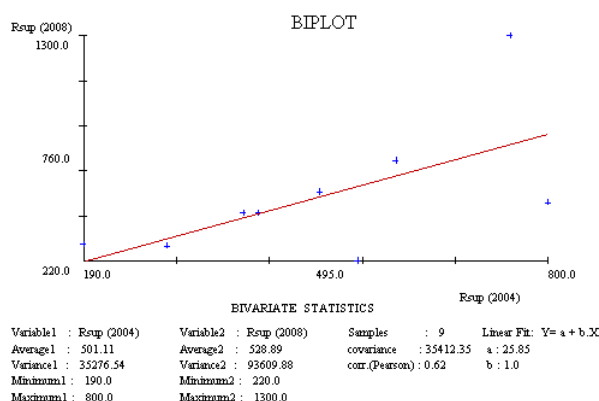


Figura 5.8 Diagrama de dispersão Rsup2004 vs Rsup2008

Na correlação entre as amostras de 2004 e 2008 foram encontrados 9 pares de amostras a menos de 5 metros de distância. O coeficiente de correlação é de 0,62, não é um valor alto, o que se pode justificar por alguns valores extremos de radiometria de superfície obtidos em 2004 e que não têm correspondência em 2008; aparentemente todos os restantes valores encontram-se alinhados, mostrando elevada correlação. A média de valores entre as duas campanhas é semelhante, ao contrário da variância, que é muito maior para a Rsup2008 (93.609,88) do que para a Rsup2004 (35.276,54), o que indica maior dispersão estatística das medições em 2008.

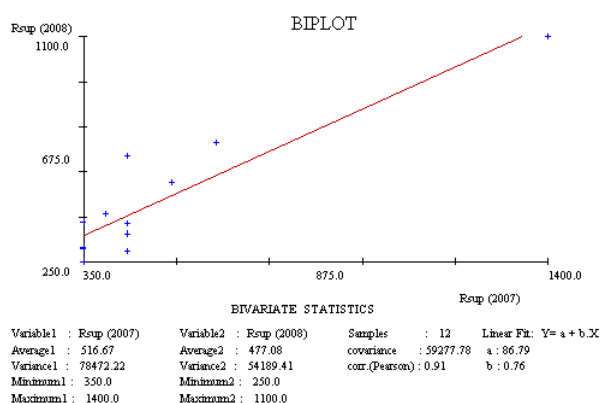


Figura 5.9 Diagrama de dispersão Rsup2007 vs Rsup2008

Na correlação entre as amostras de 2007 e 2008 foram identificadas 12 amostras. O coeficiente de correlação é de 0,78, no entanto retirando a amostra mais elevada, e ficando apenas com 11 amostras, o valor sobe para 0,91, o que corresponde a uma excelente correlação. A média entre as duas campanhas é semelhante e a variância é significativamente maior na campanha de 2007.

5.1.2.2 Análise espacial e estimação por krigagem

Para fazer a análise espacial dos dados e apresentar imagens estimadas da radiometria de superfície para as áreas estudadas em separado, foram em primeiro lugar calculados os variogramas experimentais (equação 5) e ajustados modelos teóricos.

No cálculo dos variogramas foram consideradas as orientações das campanhas de amostragem (direções predominantes) e o passo correspondeu aproximadamente ao

espaçamento médio. Sempre que necessário, estas direcções foram complementadas com o variograma omnidireccional (variograma médio de todas as direcções).

Tal como para os dados estatísticos univariados, as áreas da mina foram analisadas separadamente, por apresentarem direcções distintas, factor muito relevante na análise espacial.

Nas figuras 5.10 a 5.14 mostram-se os variogramas experimentais calculados e os modelos teóricos ajustados para cada situação (local e campanha de amostragem).

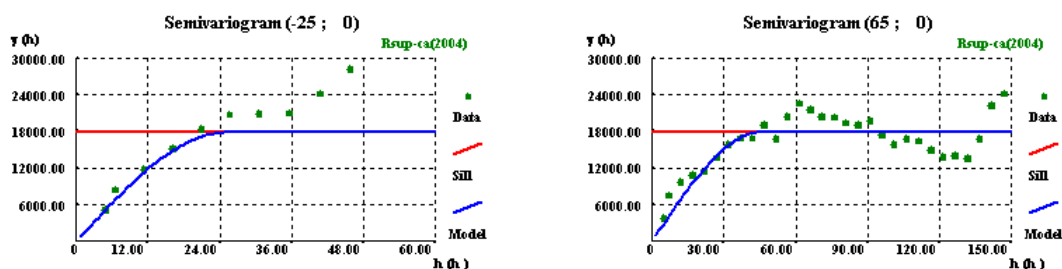


Figura 5.10 Variogramas nas direcções N25°E e N65°W para a radiometria de superfície no “céu-aberto” (2004)

Os variogramas da radiometria de superfície da área do “céu-aberto”, dados de 2004, foram ajustados por um modelo esférico anisótropo com amplitudes de 45 m e 25 m, respectivamente para a direcção N65°W e N25°E. A razão de anisotropia é sensivelmente de 2 vezes.

A forte e bem visível anisotropia, num local de génese antrópica, sugere que os resíduos da escombreira, de baixa radioactividade, serviram para aterrar o “céu-aberto” e foram espalhados, pelo menos na fase final, na direcção de maior amplitude do variograma N65°E que é coincidente com a direcção de maior desenvolvimento do “céu-aberto”.

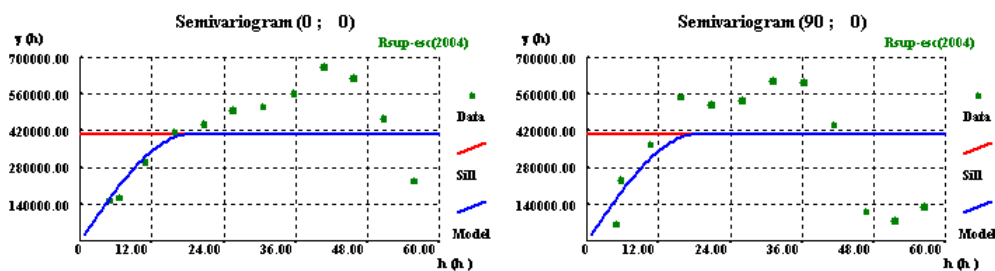


Figura 5.11 Variogramas na direcção NS e EW para a radiometria de superfície da escombreira (2004)

Os variogramas da radiometria de superfície da área da escombreira, dados de 2004, foram ajustados por um modelo esférico isótropo, com amplitude de 18 m. Este facto sugere uma deposição aleatória do material na escombreira.

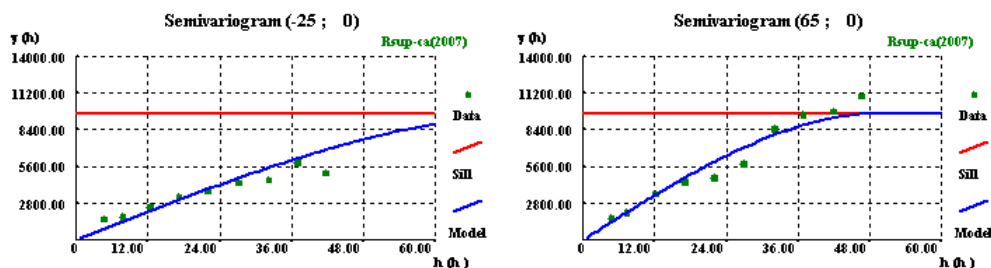


Figura 5.12 Variogramas nas direcções N25°E e N65°W para a radiometria de superfície na área envolvente do “céu-aberto” (2007)

Os variogramas da radiometria de superfície da área envolvente do “céu-aberto”, dados de 2007, foram ajustados por um modelo esférico anisótropo com amplitudes de 80 m e 50 m, respectivamente para a direcção N25°E e N65°W. A razão de anisotropia é de 1,6 vezes.

Os dados na área envolvente manifestam uma forte anisotropia tal como no “céu-aberto” propriamente dito, donde os variogramas reflectem o comportamento da fonte e do trajecto no que se refere à dispersão segundo as linhas de maior declive (confirma-se com a imagem estimada, figura 5.15).

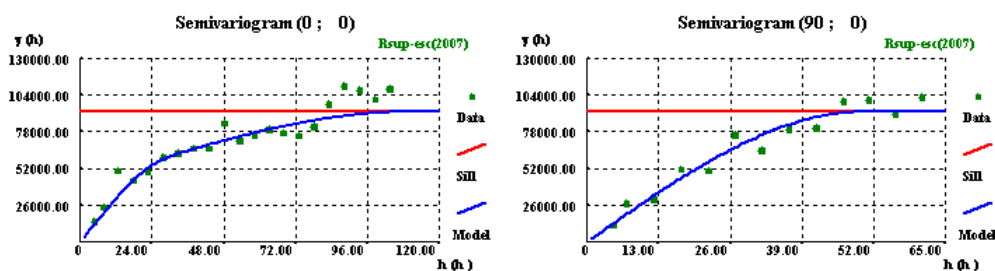


Figura 5.13 Variogramas na direcção NS e EW para a radiometria de superfície na área envolvente à escombreira (2007)

O variograma da direcção NS é um modelo imbricado que foi ajustado pela soma de duas funções esféricas, com amplitudes de 110 e 30 m; na direcção perpendicular EW

foi utilizada uma função esférica com amplitude de 50 m. Importa referir que a extensão lateral da campanha de amostragem na direcção EW pode não ter permitido encontrar uma segunda estrutura com cerca de 110 m.

Os variogramas experimentais e o modelo teórico permitem concluir que os materiais da escombreira foram dispostos de forma heterogénea e a dispersão não segue nenhuma regra em especial.

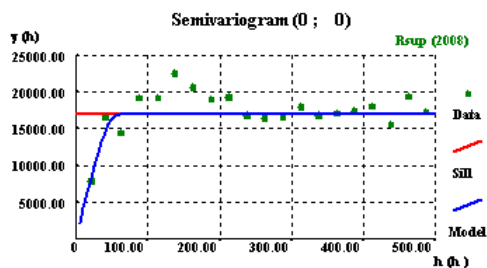


Figura 5.14 Variograma omnidireccional para a radiometria de superfície (2008)

Para a campanha de 2008 foi calculado um variograma omnidireccional e ajustado um único modelo esférico, isotrópico, com 60 m de amplitude. Não se observaram assim direcções predominantes na área em estudo.

Com os dados das 3 campanhas foram estimadas imagens da radiometria de superfície por krigagem normal (equação 6) que se apresentam nas figuras 5.15 a 5.17, respectivamente para o “céu-aberto” e envolvente (2004 e 2007), escombreira e envolvente (2004 e 2007) e dados de 2008. Importa referir que as campanhas de 2004 e 2007 são campanhas de elevada densidade de amostras e neste caso a estimação limita-se a “quase” reproduzir os valores amostrados.

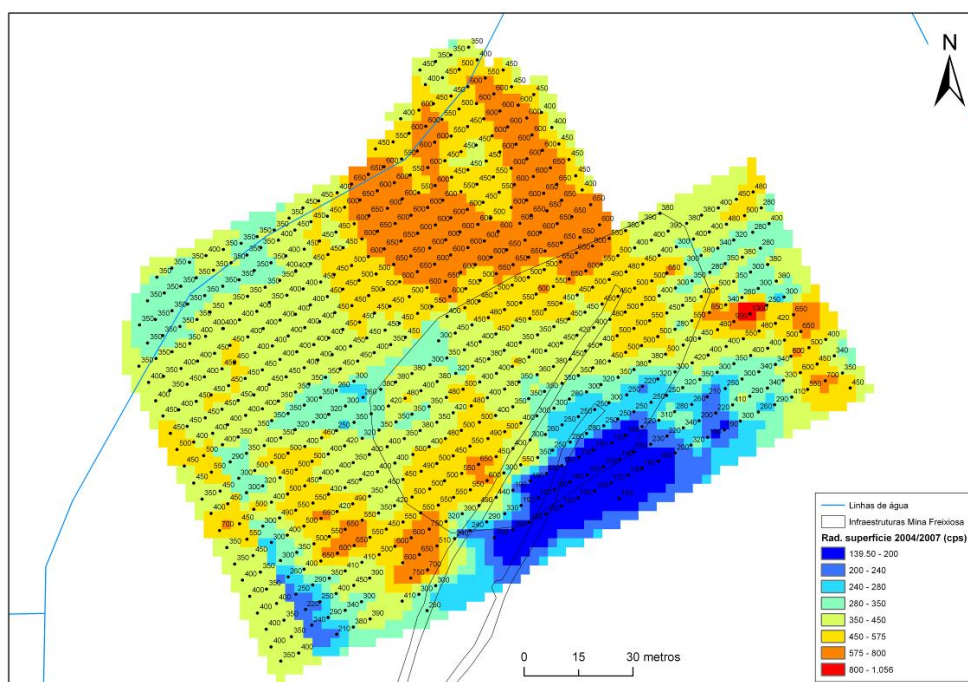


Figura 5.15 Imagem estimada da radiometria de superfície para a área do “céu-aberto” e envolvente

Na imagem da figura 5.15 observa-se continuidade lateral entre as imagens estimadas dos anos em análise 2004 e 2007, o que evidencia a mesma gama de valores. Globalmente, predominam as gamas de valores baixos e intermédios, abaixo de 240 cps e entre 350-450 cps. Como os dados seguem uma lei assimétrica positiva, os valores mais altos na imagem estimada tendem a ser suavizados ao contrário dos mínimos, mas este facto é pouco significativo porque a malha de amostragem é muito densa e não foi considerado efeito de pepita nos variogramas.

Os valores de radiometria mais elevados encontram-se na face Noroeste do “céu-aberto” e prolongam-se para o exterior na direcção da linha de água. Alguns valores anómalos, obtidos na campanha de 2004, fora da área do “céu-aberto”, podem estar relacionados com filões não explorados.

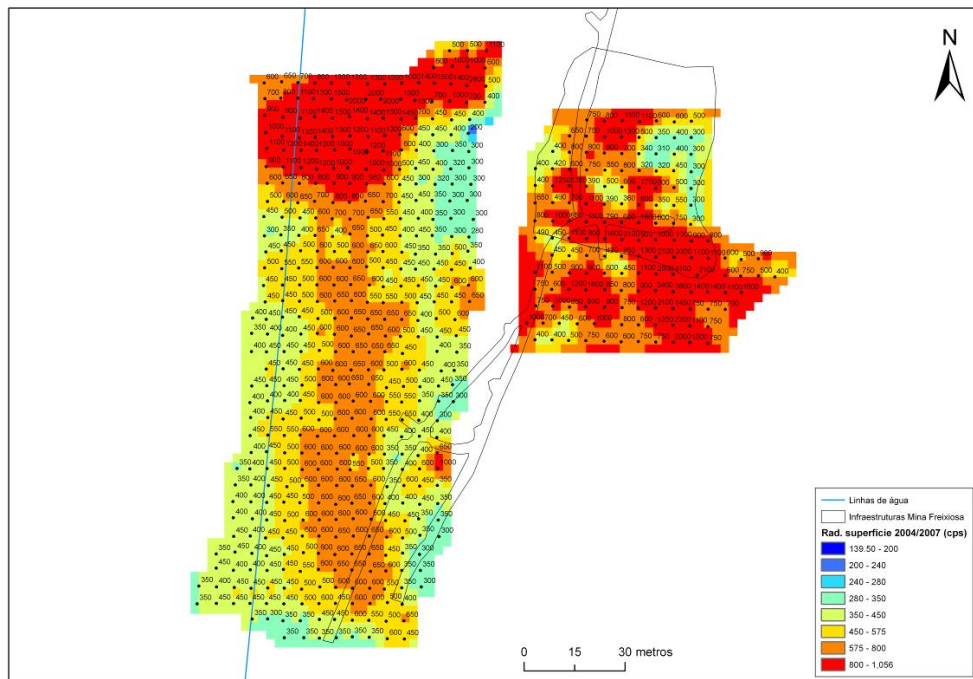


Figura 5.16 Imagem estimada da radiometria de superfície para a escombreira e envolvente

Na imagem da figura 5.16 verifica-se que, globalmente, predominam as gamas de valores mais elevados (superiores a 575 cps), especialmente no local da escombreira e na parte norte da envolvente. Este facto pode ser explicado através da emissão de radiação gama pelos materiais que compõem a escombreira e pela dispersão desses materiais. Outra justificação para os valores elevados, já fora da área da escombreira, é o afloramento da estrutura mineralizada. Por sua vez, os valores elevados na parte norte da envolvente da escombreira, relacionam-se essencialmente com a lixiviação provocada pela rega das culturas. Grande parte da água utilizada para rega daquela zona era proveniente de poços localizados nas imediações da escombreira e do “céu-aberto”, cujas águas apresentam parâmetros radiológicos elevados.

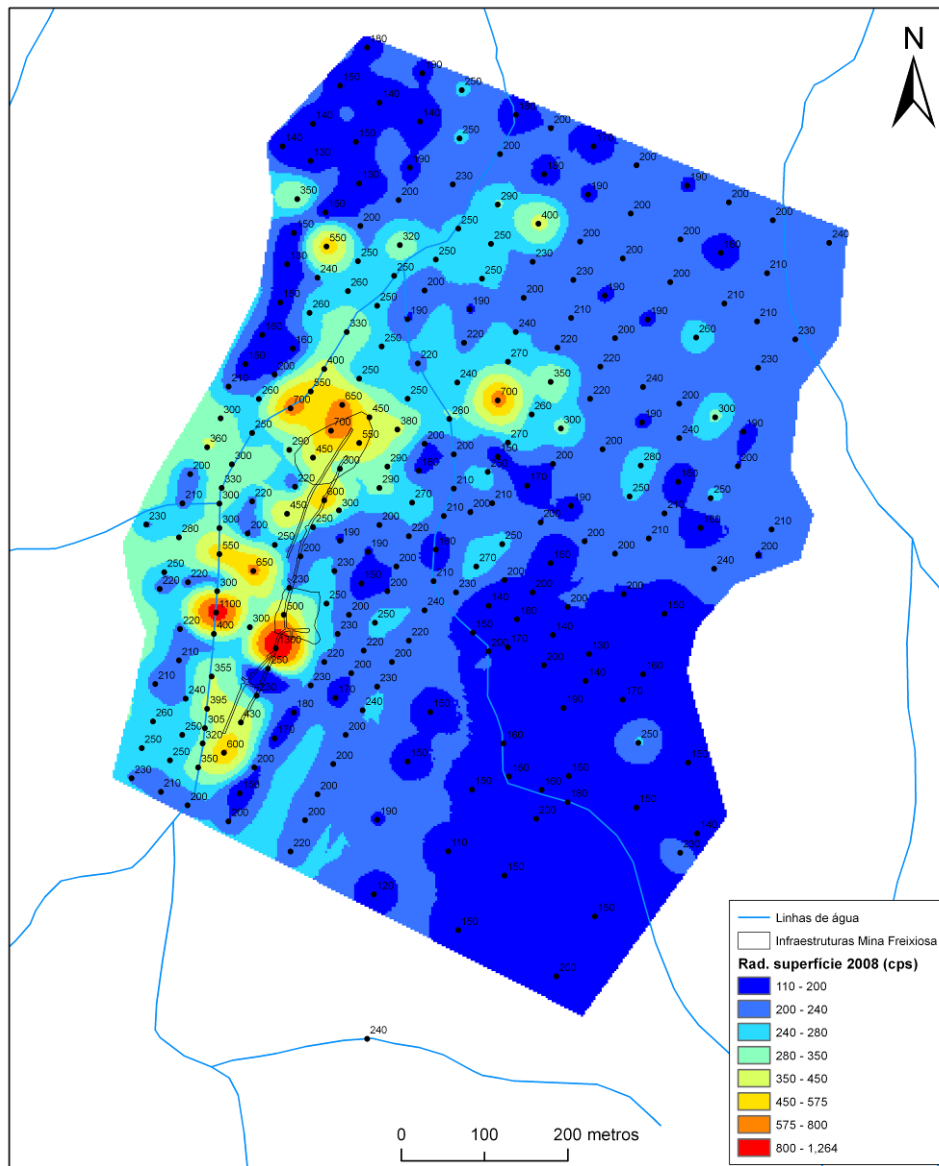


Figura 5.17 Imagem estimada da radiometria de superfície para a área em estudo (2008)

Finalmente na imagem da figura 5.17 observam-se os resultados da radiometria de superfície para os dados de 2008.

No local em estudo predominam os valores baixos, abaixo de 240 cps. Nesta imagem, e dada a lei de distribuição assimétrica positiva, a menor densidade das amostras e a amplitude do variograma relativamente baixa comparativamente à malha de amostragem, os valores extremos elevados tendem a ser suavizados e aparecem como anomalias pontuais de influência circular.

Mesmo assim, confirma-se que os valores mais elevados correspondem aos locais da escombreira, “céu-aberto” e áreas envolventes; todavia, alguns valores altos não coincidem com estes locais donde suspeita-se que possam corresponder a filões mineralizados não explorados (exemplo da zona a NE do “céu-aberto”) ou a outro(s) aterro(s) não referenciados. Estes locais devem ser alvo de investigação posterior para confirmação e caracterização mais adequada.

5.1.2.3 Análise de resultados da radiometria de superfície

As áreas mais problemáticas do local da antiga Mina da Freixiosa são, tal como expectável, a escombreira e a respectiva área envolvente. Esta zona já era esperada como sendo a mais problemática, dado que nela se depositaram, de forma aleatória, estéreis com baixo teor. O “céu-aberto” e a sua envolvente são também áreas problemáticas, mas em muito menor grau (os valores mais elevados são aqui cerca de metade dos observados na escombreira).

Através da análise dos variogramas de 2004 e 2008, é possível visualizar o modo de deposição dos materiais, essencialmente constituídos por minérios pobres, nas zonas mais problemáticas, escombreira e “céu-aberto”, assim como as consequências que esta deposição tem para as áreas envolventes. Esta avaliação revela-se de extrema importância, não só para o presente estudo, mas essencialmente em futuras obras de remediação, pois permite identificar quais os locais prioritários de intervenção.

A imagem estimada com os dados de 2008 serviu para mostrar qual a tendência dos valores de radiometria de superfície na região em estudo, essencialmente nas áreas envolventes às infra-estruturas mineiras, e permitiu confirmar a gama de valores das campanhas anteriores no “céu-aberto” e na escombreira.

5.1.3 Radiação Externa e Dose Absorvida

A radiação externa é o parâmetro, utilizado para o cálculo do risco de exposição ou, por outras palavras, a dose a que um ser humano fica exposto num dado local, denominada por dose absorvida.

A sua correcta análise permite identificar zonas de anomalias (naturais, como por exemplo, filões) e zonas de intervenção prioritária em locais com forte componente radioactiva, deste modo é um parâmetro muito utilizado em estudos de impacte ambiental.

É um dos parâmetros, juntamente com a emissão de radão, mais representativos e utilizados para o cálculo da dose efectiva, de facto para o presente trabalho a análise de risco à Mina da Freixiosa foi realizada de acordo com os resultados obtidos para a radiação externa.

As imagens estimadas da dose absorvida tiveram em conta os valores medidos no local com o aparelho, os resultados não foram sujeitos a nenhum tratamento, à excepção da conversão de choques para dose absorvida [$\mu\text{Gy/h}$] de acordo com a calibração do aparelho (equação 4).

5.1.3.1 Análise estatística

Também para as medições da radiação externa (dose absorvida), os dados foram tratados separadamente, para o “céu-aberto” e para a escombreira, para as campanhas de 2004 e 2007 e foram tratados em conjunto para a campanha de 2008. Os resultados obtidos da análise univariada estão representados nas figuras seguintes, 5.18 a 5.22.

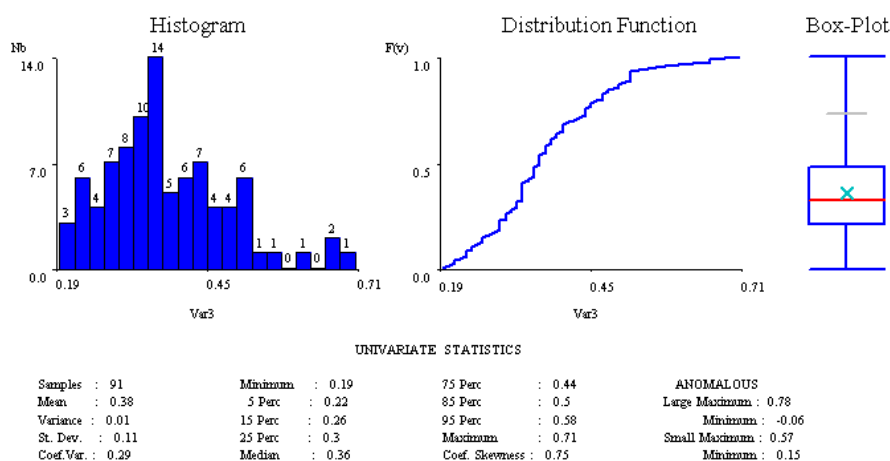


Figura 5.18 Estatísticos univariados para a área do “céu-aberto” (2004)

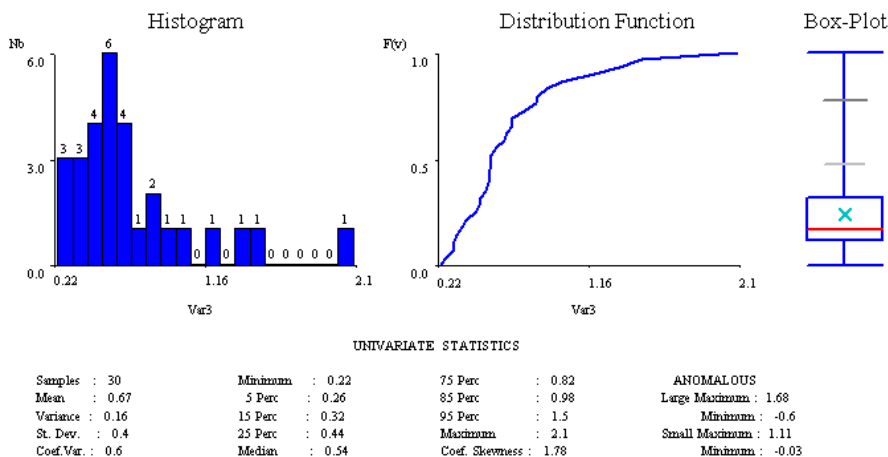


Figura 5.19 Estatísticos univariados para a área da escombreira (2004)

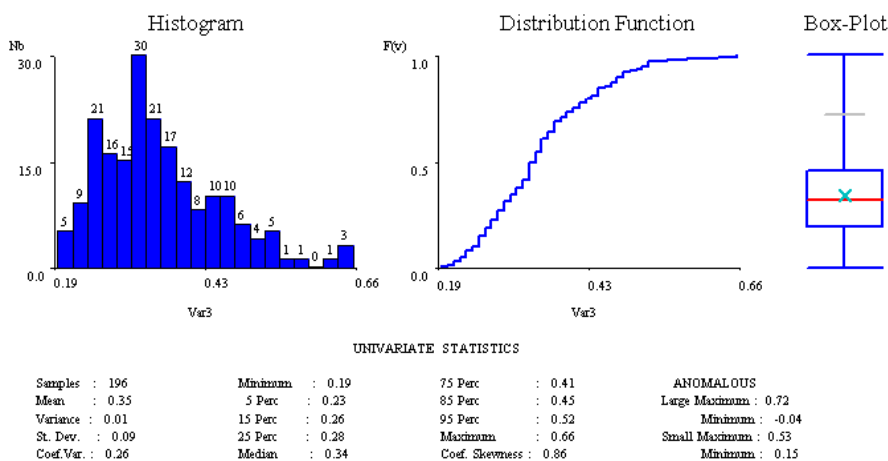


Figura 5.20 Estatísticos univariados para a envolvente do “céu-aberto” (2007)

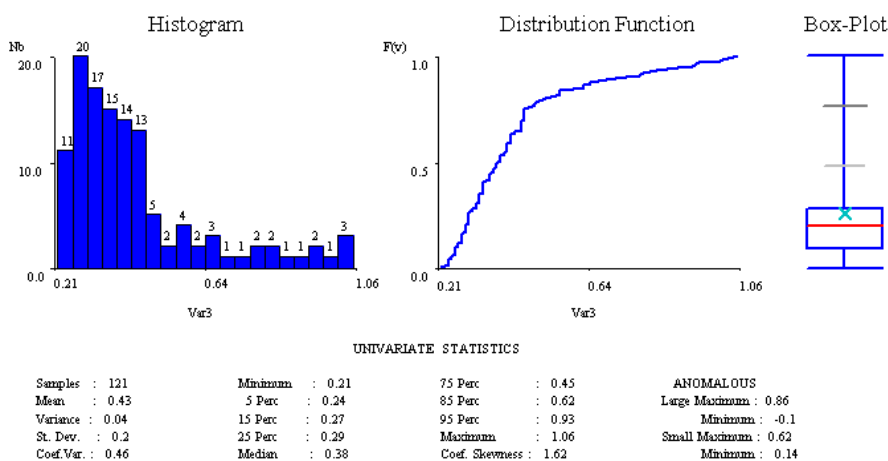


Figura 5.21 Estatísticos univariados para a envolvente da escombreira (2007)

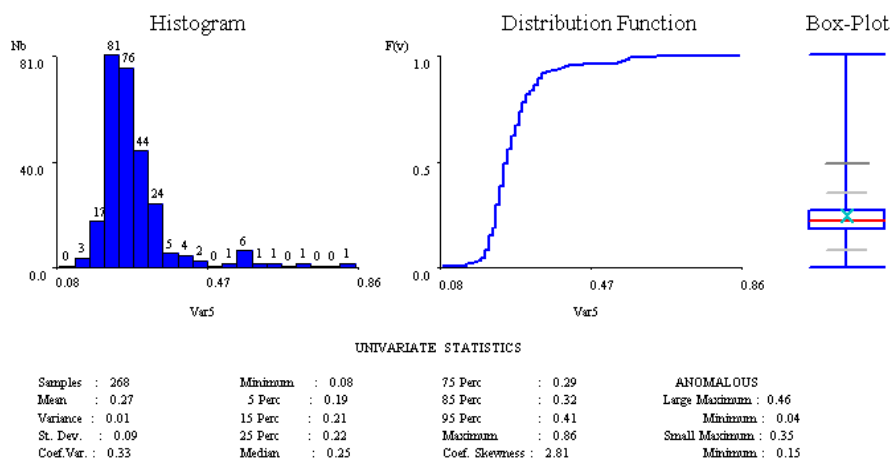


Figura 5.22 Estatísticos univariados para a área total(2008)

Na tabela 5.2 mostram-se os parâmetros estatísticos de síntese das medições de radiação externa para as três campanhas realizadas por local.

Tabela 5.2 Dados estatísticos univariados para a radiação externa

Campanha	Local	Média (μGy/h)	Mediana (μGy/h)	Desvio padrão (μGy/h)	Máximo (μGy/h)	Mínimo (μGy/h)	Número de medições
2004	“Céu-aberto”	0,38	0,36	0,11	0,71	0,19	91
	Escombreira	0,67	0,54	0,40	2,10	0,22	30
2007	Envolvente do “céu-aberto”	0,35	0,34	0,09	0,66	0,19	196
	Envolvente da escombreira	0,43	0,38	0,20	1,06	0,21	121
2008	Área total	0,27	0,25	0,09	0,86	0,08	268

Da análise dos histogramas verifica-se que as medições de todas as campanhas seguem uma lei de distribuição assimétrica positiva, concentrando-se as medições para os valores mais baixos e as medições anómalas para os valores mais altos.

Os valores mais elevados de radiação externa são obtidos na zona da escombreira em 2004 (2,10 μGy/h), e envolvente em 2007 (1,06 μGy/h), tal como se verificou para a radiometria de superfície. Efectivamente, apenas na escombreira e respectiva envolvente, os valores máximos de radiação externa ultrapassam a unidade (1 μGy/h), donde estas são as áreas mais problemáticas. Esta segunda análise (radiação externa)

encontra-se em sintonia com a análise anterior (radiometria de superfície) no que respeita às áreas mais problemáticas.

No que respeita à campanha de 2008, também para a radiação externa, os dados estatísticos são os globalmente mais baixos (menor média, mediana e mínimo) dado que a área envolvida é muito abrangente e atinge muitas áreas com o fundo normal do local.

Para a radiação externa também foi feita uma análise de correlações entre os anos de 2004 (Rext2004), 2007 (Rext2007) e 2008 (Rext2008), tal como foi apresentada anteriormente para a radiometria de superfície. Os resultados apresentam-se nas figuras 5.23 e 5.24.

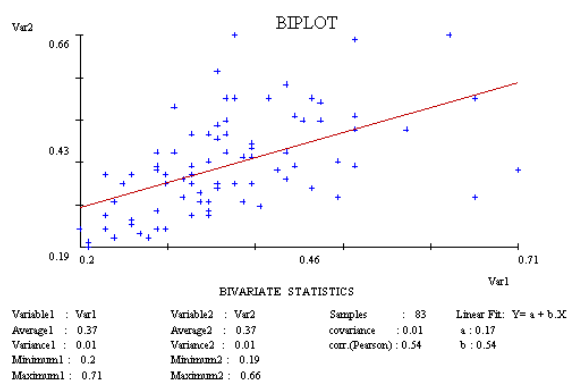


Figura 5.23 Diagrama de dispersão Rext2004 vs Rext2007

Devido à existência de pontos comuns na campanha de radiação externa, entre o ano de 2004 e 2007, foi realizada uma análise da correlação entre estes dois anos. Identificaram-se 83 pares de valores, correlacionáveis entre si por uma distância inferior a 1 metro. Ao contrário do que seria esperado, por se tratar essencialmente de pontos localizados exactamente no mesmo local, o coeficiente de correlação é relativamente baixo 0,52. A justificação para o baixo coeficiente de correlação pode ser atribuída ao número de anos que separam estas medições, 3, assim como a posição do aparelho de medição, não ter sido exactamente a mesma. Os parâmetros estatísticos, tais como a média, variância, mínimo e máximo são todavia semelhantes.

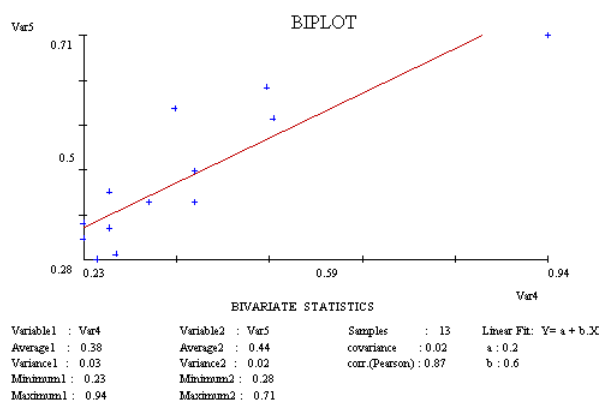


Figura 5.24 Diagrama de dispersão Rext2004 vs Rext2008

Para as campanhas 2004 e 2008 foram considerados 13 pares de valores correlacionáveis a menos de 5 metros, que permitiram obter um coeficiente de correlação de 0,87, ou seja, uma boa correlação. Os dados estatísticos destes 13 pares de valores são semelhantes.

Para as campanhas 2007 e 2008 foram encontrados apenas 5 pares de valores correlacionáveis a menos de 5 metros e, por isso, não se apresenta a análise bivariada.

5.1.3.2 Análise espacial e estimação por krigagem

A análise espacial da radiação externa seguiu os mesmos procedimentos já referidos anteriormente para a radiometria de superfície.

Nas figuras 5.25 a 5.29 mostram-se os variogramas experimentais e os modelos teóricos ajustados para cada situação (local e campanha de amostragem).

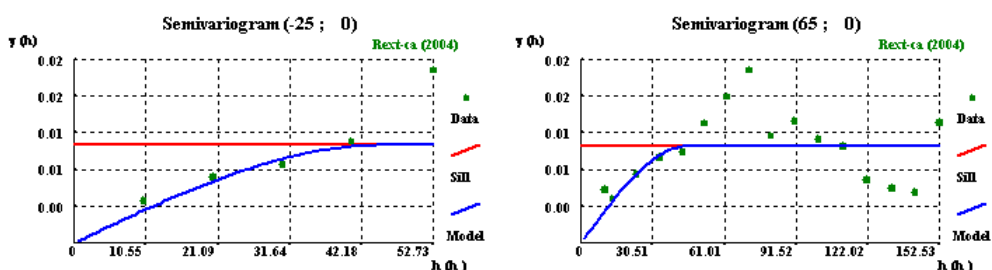


Figura 5.25 Variogramas nas direcções N25°E e N65°W para a radiação externa no “céu-aberto” (2004)

Para os variogramas da figura 5.25 foi ajustado um modelo isotrópico do tipo esférico com amplitude de 45 m. Note-se que na radiação externa não é evidente a forte anisotropia encontrada na variável radiometria de superfície pelo que se confirma que estes valores deixam de ser referenciados a um suporte pontual e passam a estar referenciados a um suporte do tipo área.

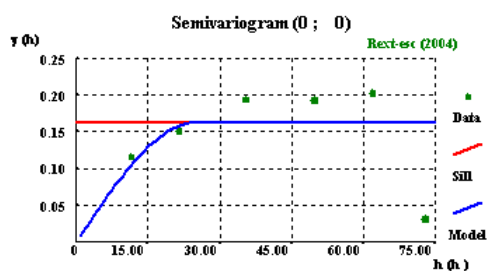


Figura 5.26 Variogramas na direcção omnidireccional para a radiação externa na escombreira (2004)

Para o variograma da figura 5.26 foi ajustado um modelo isotrópico do tipo esférico com amplitude de 25 m. Neste caso optou-se por apresentar os resultados do variograma omnidireccional por não ter sido possível ajustar um modelo ao variograma experimental da direcção EW.

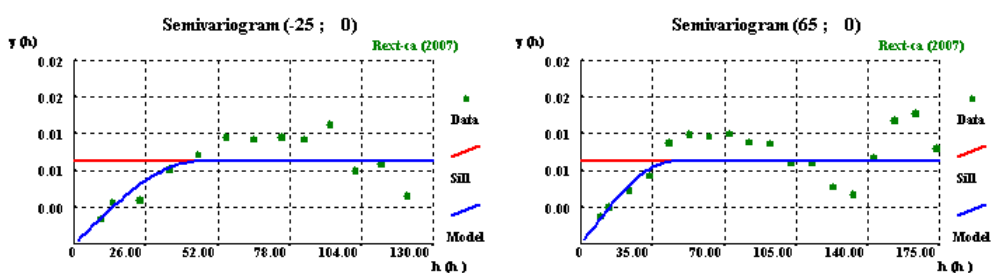


Figura 5.27 Variogramas nas direcções N65°E e N25°W para a radiação externa no “céu-aberto” e envolvente (2007)

Para os variogramas da figura 5.27 foi ajustado um modelo isotrópico do tipo esférico com amplitude de 45 m, que é o mesmo que foi utilizado para o ano de 2004 com os dados obtidos, em parte, nos mesmos locais.

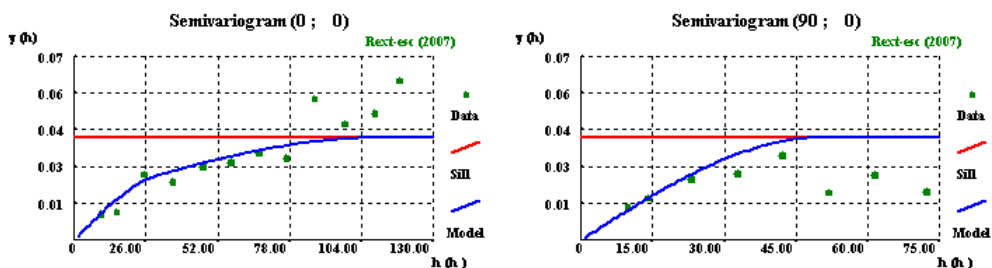


Figura 5.28 Variogramas nas direcções NS e EW para a radiação externa na escombreira e envolvente (2007)

Tal como os dados referentes à radiometria de superfície, o variograma da radiação externa na direcção NS foi ajustado pela soma de dois modelos, de tipo esférico, com amplitudes respectivamente de 30 e 110 m; para a direcção EW foi obtida uma amplitude de 50 m. Também aqui é evidente que a extensão lateral da campanha de amostragem na direcção EW pode não ter permitido encontrar uma segunda estrutura com cerca de 110 m.

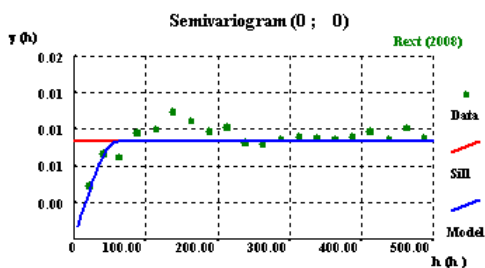


Figura 5.29 Variograma omnidireccional para a radiação externa (2008)

Finalmente, para o variograma experimental da figura 5.29, foi ajustado um modelo teórico esférico e isotrópico com 60 m de amplitude.

Depois do cálculo e ajustamento dos variogramas experimentais foram estimadas imagens de radiação externa (dose absorvida) para os locais amostrados ($\mu\text{Gy/h}$).

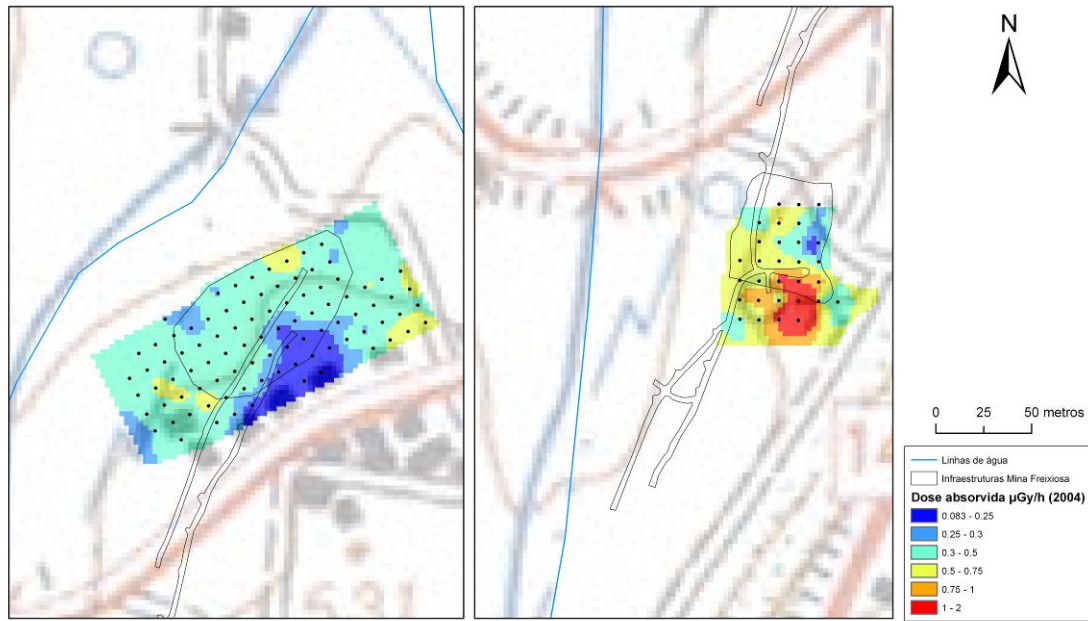


Figura 5.30 Imagem estimada da dose absorvida para o “céu-aberto” (esquerda) e escombreira (direita), 2004

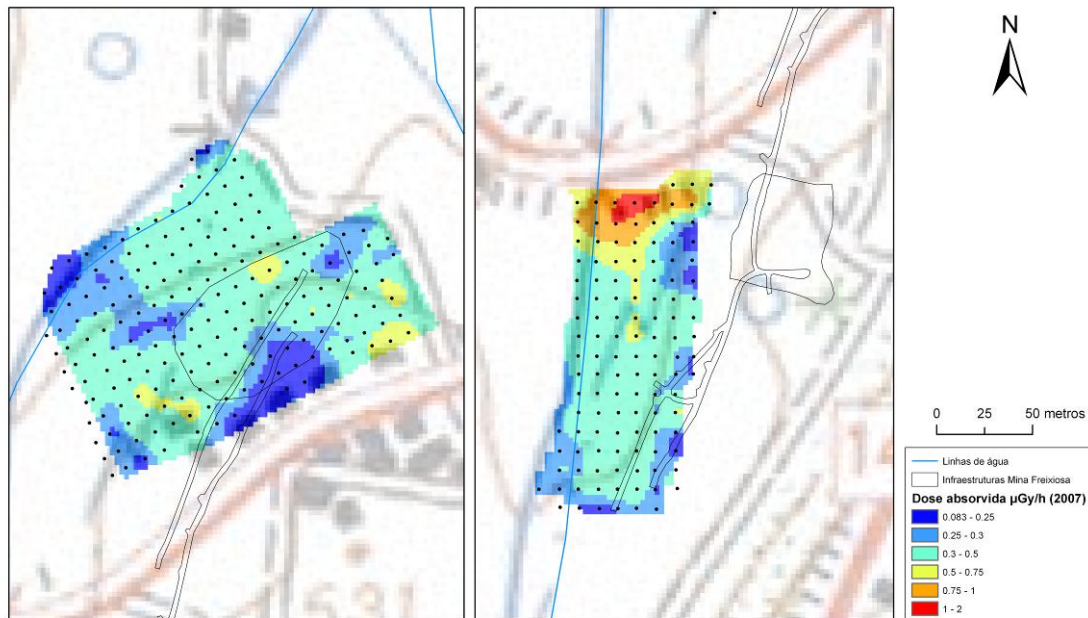


Figura 5.31 Imagem estimada da dose absorvida para o “céu-aberto” e envolvente (esquerda) e para a área envolvente da escombreira (direita), 2007

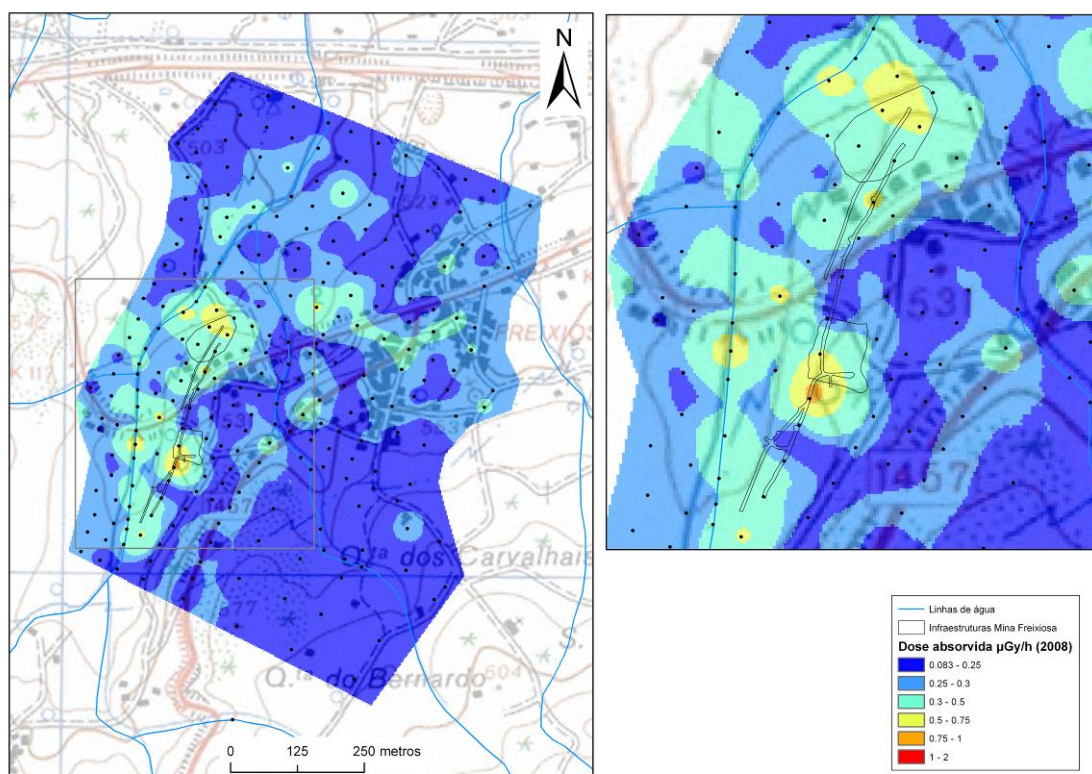


Figura 5.32 Imagem estimada da dose absorvida $\mu\text{Gy/h}$, 2008

5.1.3.3 Análise de resultados da radiação externa

Através da análise das imagens estimadas da radiação externa, mais uma vez se conclui que as zonas com os níveis mais elevados de radiometria são a escombreira o “céu-aberto” e respectivas envolventes.

Os resultados obtidos entre as diferentes campanhas são semelhantes entre si, no que respeita aos valores obtidos para a dose absorvida nas áreas comuns. Em grande parte da zona de estudo a dose absorvida não ultrapassa os $0,5 \mu\text{Gy/h}$, à excepção das áreas consideradas problemáticas.

As imagens estimadas obtidas, serviram de ponto de partida para a determinação da dose efectiva para a componente da radiação externa, a qual permitiu determinar o risco radiológico da área de estudo.

5.1.4 Radão

O radão devido à sua elevada densidade concentra-se essencialmente na parte superficial do solo, no entanto dispersa-se rapidamente no ar. O risco associado a este gás apenas existe nos locais fechados, ou por outras palavras, os níveis de emissão de radão podem ser elevados para um determinado local, mas só representam um risco para a saúde se existirem habitações, permitindo a sua acumulação num espaço pouco ventilado.

Embora em Portugal não exista nenhum valor limite para a concentração de radão no ar, a Norma Europeia, USEPA standard 40 CFR61.22, CFR 1902.02 (EDM, 2007), utilizada nestes casos, estabelece como limites para o fluxo de radão em escombros de minas de urânio desactivadas o valor de $20\text{pCi/m}^2\text{s}$, ao que corresponde um valor de $0,74\text{ Bq/m}^2\text{s}$.

Para os locais fechados, como referido anteriormente o valor estabelecido é de 400 Bq/m^3 . No âmbito deste estudo os valores obtidos não podem ser comparados com o valor máximo admitido dentro de uma habitação, sem tempo de acumulação, isto porque as medições foram efectuadas no exterior para um período de 24 horas. Os resultados obtidos apenas servem para acautelar a construção de casas na zona em estudo.

Na figura 5.36 estão localizados os 16 pontos amostrados para a emissão de radão do solo. A escolha destes pontos não foi aleatória, teve como base os resultados da campanha de radiometria de superfície.

Todos os pontos coincidiram com os utilizados nas campanhas de radiometria de superfície e radiação externa, foi tido em atenção as gamas mais altas de valores (pontos: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13, 14, 15 e 16) e as gamas mais baixas (pontos: 6, 8, 9, 10, e 12); linhas de água (pontos: 10, 11, 12 e 14); caminhos (pontos: 8 e 9); infra-estruturas da mina (pontos: 2, 2, 4 e 13) e terrenos ocupados por casas ou colheitas (pontos: 13, 15 e 16).

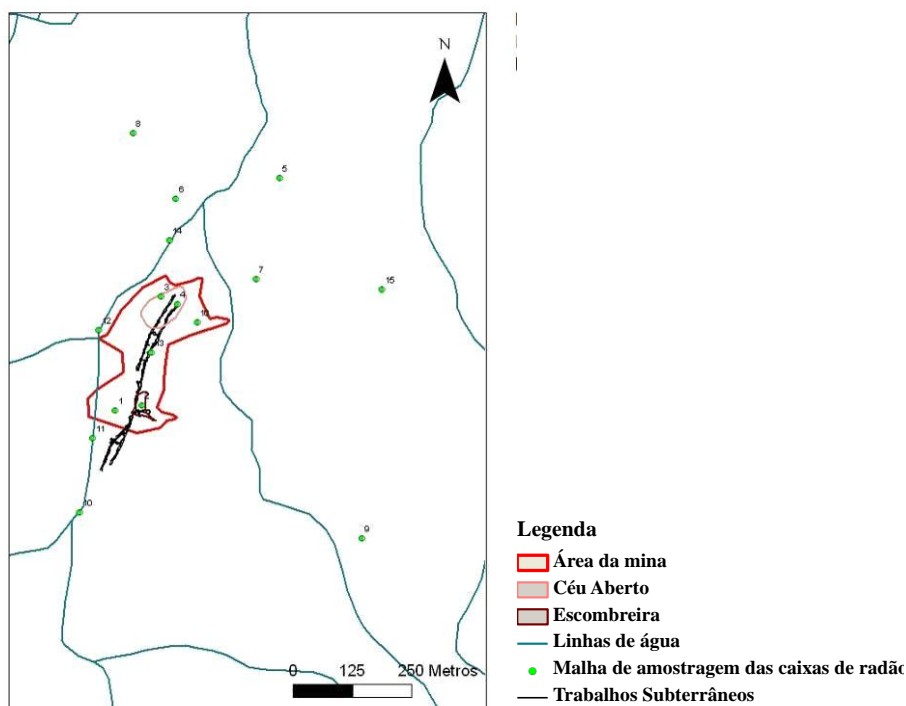


Figura 5.33 Malha de amostragem da campanha de emissão de radão (2008)

5.1.4.1 Análise estatística

Os estatísticos univariados para as leituras de radão acumulados na caixa estão representados na figura 5.37. Na tabela 5.3 mostram-se os parâmetros estatísticos de síntese.

Dos 16 locais amostrados apenas se consideraram 15, pois um dos pontos apresentou um valor muito baixo, 45 Bq/m^3 , e erro de 100%, logo foi desprezado para a análise estatística. Uma das possíveis razões de falha de leitura é um mau isolamento da caixa de acumulação.

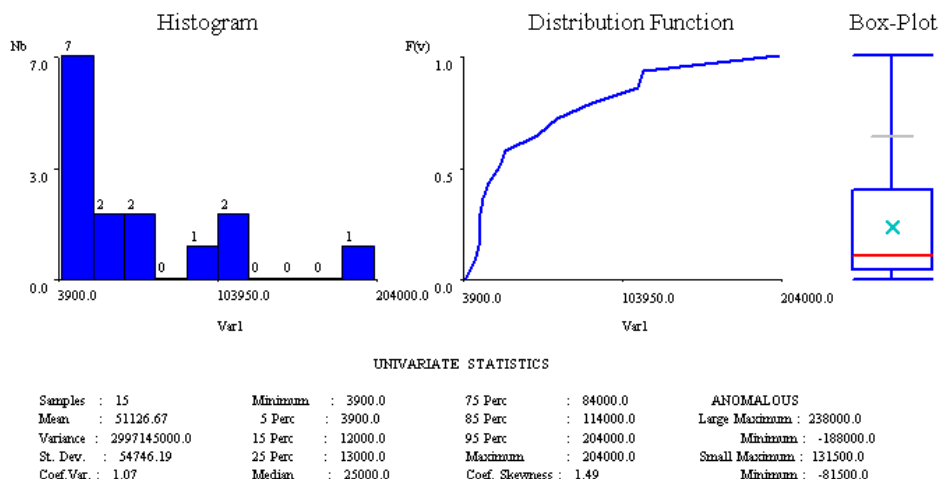


Figura 5.34 Estatísticos univariados para a campanha de emanção de radão

Tabela 5.3 Dados estatísticos univariados das concentrações de radão acumulado na caixa

Campanha	Média (Bq/m ³)	Mediana (Bq/m ³)	Desvio padrão (Bq/m ³)	Máximo (Bq/m ³)	Mínimo (Bq/m ³)	Número de medições
2008	51.126,67	25.000,00	54.746,19	204.000,00	3.900,0	15

De acordo com a análise do histograma verifica-se que as medições seguem uma bi-distribuição. Devido à variedade da grandeza dos valores a média e a mediana são muito distintas uma da outra. O valor máximo localiza-se na envolvente da escombreira, 204.000 Bq/m³, e o mínimo 3.900 Bq/m³, a jusante da área mineira, perto da EN16, este valor é considerado muito elevado para o local em questão.

5.1.4.2 Análise de resultados da emanção de radão

Os valores obtidos para a emanção de radão são muito discrepantes entre si. Locais onde eram esperados valores baixos, como por exemplo os pontos 8 e 9, obtiveram-se valores elevados.

Em todos os locais amostrados, foi feito o levantamento do tipo de solo, de forma a identificar a influência do mesmo nos valores obtidos. Regra geral os solos cultivados apresentaram valores mais elevados do que os restantes, à excepção dos locais mais problemáticos, uma das razões principais para este facto é a menor compactação destes

solos por serem constantemente remexidos, permitindo uma maior mobilidade do gás. Como se pode ver através da tabela 5.4 e da figura 5.36, os valores mais elevados localizam-se na zona da escombreira, no “céu-aberto” e sobre o filão aflorante na região. Merece especial atenção, um ponto amostrado localizado numa propriedade privada sobre o terreno de cultivo, que apresentou o valor de 49.000 Bq/m³; esta propriedade localiza-se dentro do limite da área mineira, a montante do “céu-aberto”.

O quadro 5.4 mostra os resultados, ponto a ponto, da campanha de emissão de radão e o respectivo fluxo de radão (equação 7), por m²s⁻¹.

$$\text{Fluxo de radão [mBq/m}^2\text{s]} = \text{Concentração radão [Bq/m}^3\text{]} \times \text{Altura caixa[m]} / (24 \times 3600[\text{s}] \times 1000) \quad (7)$$

O fluxo de radão é directamente proporcional à concentração de radão medido na caixa.

Tabela 5.4 Resultados da campanha de emissão de radão

Ponto	Ocupação do solo	Leituras no RTM2000			Leitura inicial (Bq/m ³)	Fluxo de radão (mBq/m ² s) (eq. 8)	Fluxo de radão (Bq/m ² s)
		Radiometria superfície (cps)	Concentração radão (Bq/m ³)	% de erro			
1	Pinheiros/ escombrelras/ caminho	1.500	204.000	1,5	380	708.33	0,71
2	Pinheiros/ escombrelras	2.500	117.000	1,9	37	406.25	0,41
3	Cedros	500	114.000	2,0	39	395.83	0,39
4	Solo árido	300	14.000	5,7	39	48.61	0,05
5	Cultivo de milho	250	62.000	2,7	202	215.28	0,2
6	Pastagens	220	12.000	2,5	42	41.67	0,04
7	Cultura de cereais	600	84.000	2,3	39	291.67	0,29
8	Silvas	150	3.900	1,1	50	13.54	0,01
9	Videira	150	9.000	7,2	79	31.25	0,03
10	Pastagens/ linha de água	200	45	100	45	0,16	0,00016
11	Pastagens/ linha de água	450	29.000	3,9	45	100.69	0,10
12	Pastagens/ linha de água	320	25.000	4,2	40	86.81	0,09
13	Cultivo de milho	300	49.000	3,0	40	170.14	0,17
14	Pastagens/ linha de água	270	18.000	4,8	42	62.50	0,06
15	Couves	200	13.000	5,9	39	45.14	0,05
16	Gravilha	280	13.000	6,0	39	45.14	0,05

A figura 5.38 mostra os 15 locais amostrados considerados válidos e os valores da taxa de emissão.

Face aos valores apresentados, e segundo a Norma Americana, os locais amostrados não representam um perigo potencial, à excepção da zona da escombrelra, dado que neste local atinge-se o valor de 0,71 Bq/m²s, face ao limite de 0,74 Bq/m²s, para minas de urânio desactivadas. Nos restantes locais os valores são inferiores, mas em alguns deles, como o ponto 2 e 3, escombrelra e céu aberto, respectivamente os valores aproximam-se do limite. Embora os locais amostrados não apresentem risco, isto não significa, que face a uma permanência no local por períodos consecutivos, não ocorra perigo para os

habitantes. A construção de habitações nos locais analisados não é aconselhável, face à pouca ventilação, tipo de solo e a própria envolvente, nestes casos uma medição dos valores de emanção de radão poderia ultrapassar o máximo recomendado e constituir um perigo para a saúde pública.

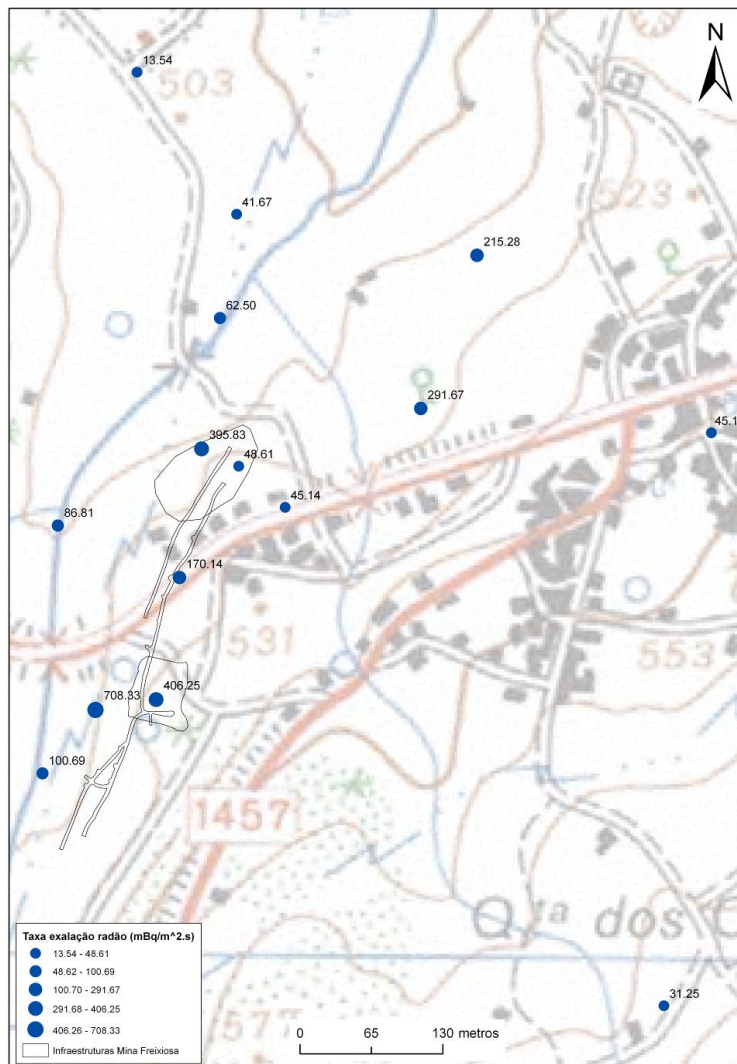


Figura 5.35 Fluxo radão para os 15 locais amostrados considerados válidos

5.2 Modelo de Análise de Risco adoptado

5.2.1 Aplicação à Área Mineira da Freixiosa – Dose Efectiva

Após as medições efectuadas, pode-se identificar com base nos valores radiométricos e de radão, quais os locais onde os mesmos eram mais elevados, representando por

consequente um problema. Com base no modelo conceptual definido, os principais problemas localizam-se na **fonte**, “céu-aberto” e escombreira, influenciados não só pela anterior actividade mineira como também pelo **trajecto**, meio rochoso fracturado.

Como referido no capítulo anterior, o parâmetro radiação externa, permite determinar a dose efectiva a que um indivíduo está sujeito, admitindo um período de permanência no local contaminado, de 1 ano e durante 24 horas, logo o pior cenário possível e de certa forma, hipotético. Como tal, com base nas imagens estimadas da dose absorvida (equação 8), aplicando o factor tempo e uma constante que depende do nível etário do público-alvo, neste caso considerando um adulto (0,7), obtem-se as imagens da dose efectiva (mSv/ano), figuras 5.36 a 5.38 (segundo proposta da EDM para o cálculo da dose efectiva, equação 3).

$$Dose\ efectiva\ (mSv/ano) = Dose\ absorvida\ (\mu Gy/h) \times 24 \times 365,25 \times 0,7 \times 0,001 \quad (8)$$

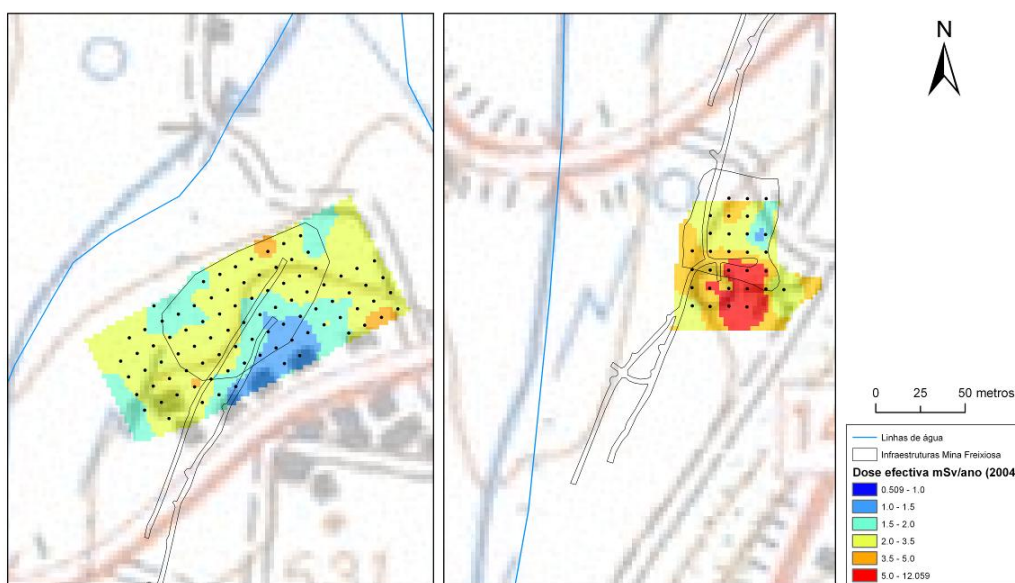


Figura 5.36 Imagens da dose efectiva estimada apenas considerando a componente radiação externa, para o “céu-aberto” (esquerda) e escombreira (direita), 2004

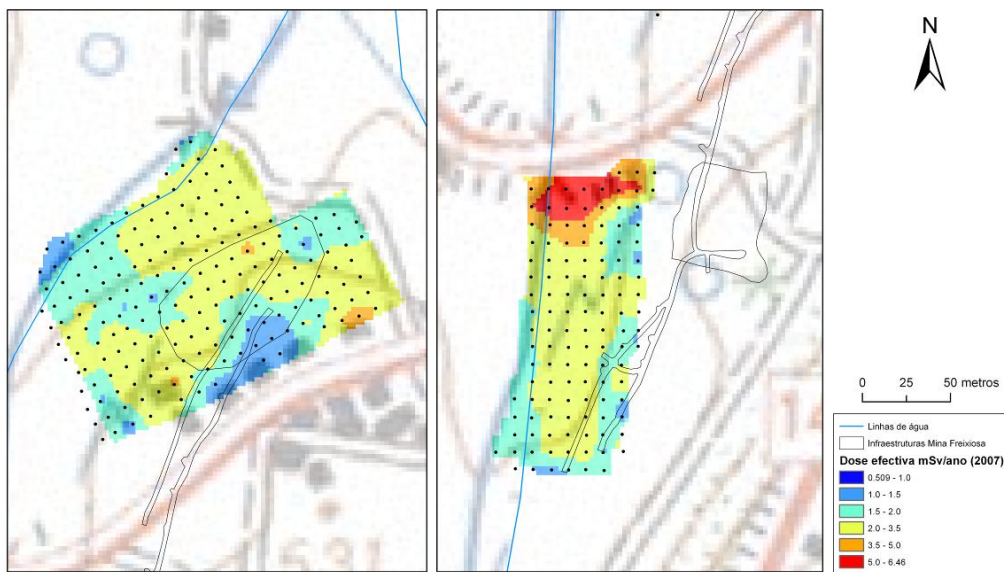


Figura 5.37 Imagens da dose efectiva estimada apenas considerando a componente radiação externa, para o “céu-aberto” e envolvente (esquerda) e para a área envolvente da escombreira (direita), 2007

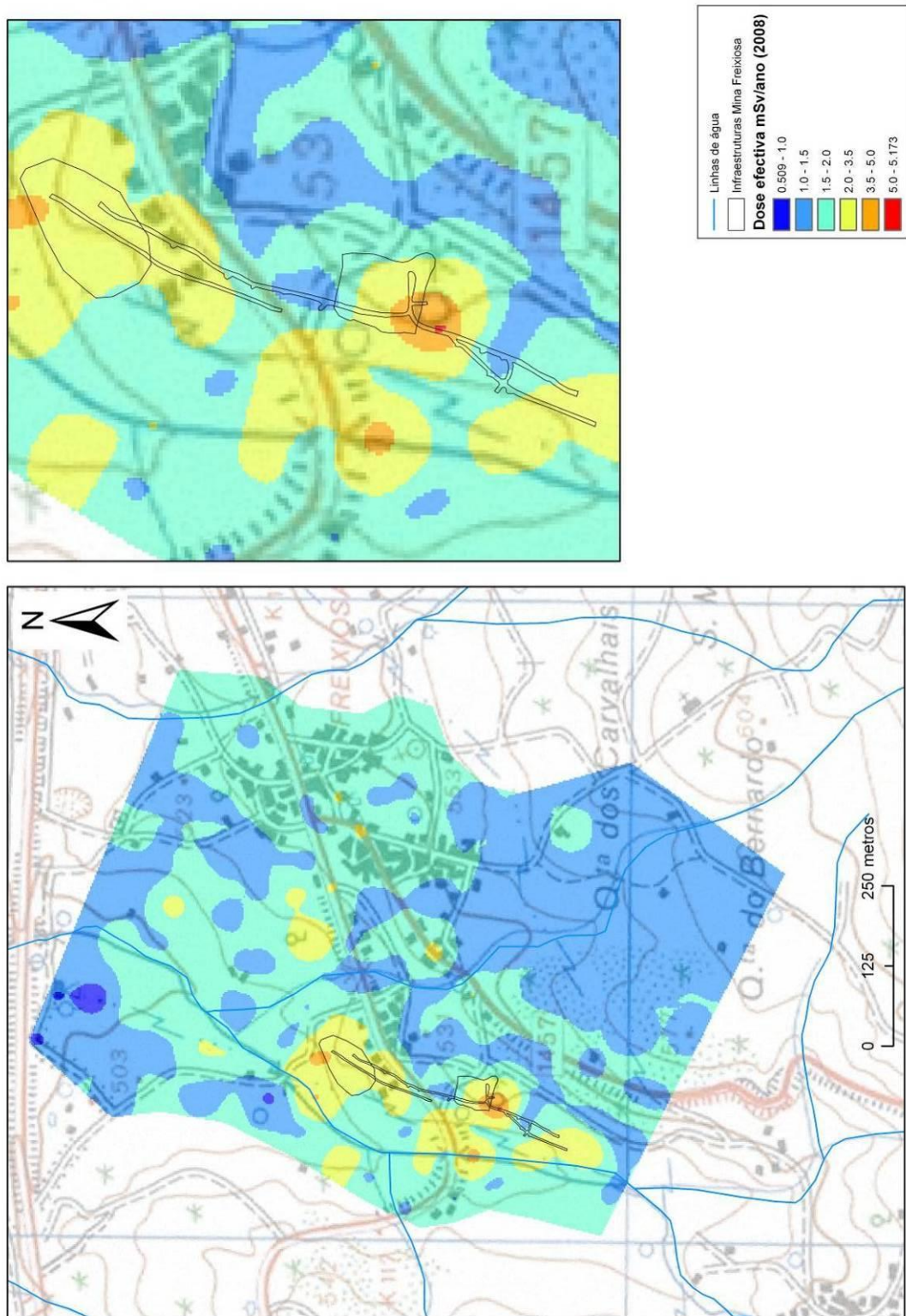


Figura 5.38 Imagem da dose efectiva estimada apenas considerando a componente radiação externa (2008)

Numa primeira análise, com base no máximo permitido para a dose efectiva para a população em geral, de 1mSv/ano, os locais dos antigos “céu-aberto” e escombreira encontram-se, na sua maior parte, acima deste valor de referência, no entanto estes valores incluem o fundo natural do local, que corresponde a aproximadamente 1,5 mSv/ano, deste modo apenas se consideram como zonas de risco os locais acima de 2,5 mSv/ano, e considerando que todos os restantes parâmetros envolvidos no cálculo da dose efectiva são pouco representativos para este caso.

Para estes locais é recomendada a colocação de sinalética e, logo que possível, uma intervenção de remediação dos mesmos. Também não é aconselhável a permanência por longos períodos de tempo nas áreas em questão.

Relativamente à imagem da dose efectiva para a campanha de 2008, tal como referido para a radiometria de superfície, os valores mais elevados estão certamente mais suavizados. A maior parte dos valores encontra-se no intervalo de 1.5 – 2 mSv/ano, estes valores acompanham não só as infra-estruturas da mina como o filão aflorante na região, este facto é bem visível, tal como sucedeu para a radiometria de superfície, no sentido NE da área de estudo, onde aflora uma mancha de valores mais elevados, a qual se tivesse sido estudada em pormenor revelaria a direcção do filão de quartzo. Relativamente às zonas habitadas, apenas as que se localizam próximo do céu aberto são consideradas problemáticas.

5.2.2 Classificação dos Elementos de Risco Radiométrico

O presente sub-capítulo é considerada uma conclusão de todo o trabalho desenvolvido nos capítulos anteriores. Com base nos dados radiométricos foi possível identificar as zonas mais problemáticas da mina da Freixiosa, isto é, zonas que devido aos níveis elevados e proximidade à povoação possam ser consideradas de risco, deste modo determinou-se que o “céu-aberto” e a escombreira apresentavam essas características.

Foi feita uma análise com base nas áreas mais problemáticas, por apresentarem características muito similares do ponto de vista do risco, o “céu-aberto” e a escombreira foram analisadas em conjunto. Para estas zonas, de acordo com o estado actual, 24 anos após o seu encerramento, e para os aspectos estudados no âmbito deste

trabalho, foi atribuído possíveis cenários de perigo potencial, ou elementos de risco radiométrico. Foi ainda considerada a área da antiga exploração subterrânea.

Cada um dos elementos de risco radiométrico foi avaliado e classificado por um Índice de Ocorrência (a probabilidade de ocorrência do risco) e um Índice de Gravidade (a escala de impacto se o evento ocorrer).

Estes índices apresentam-se em três escalas que variam de 1 – 3, e na qual a escala 1 é a mais baixa, logo menos preocupante, e a escala 3 a mais elevada e a que merece mais atenção.

O risco é a combinação da probabilidade, ou frequência, de ocorrência de um evento perigoso ou uma falha e a magnitude das consequências da sua ocorrência (Laurence, 2006).

As tabelas 5.5 e 5.6 mostram os descritores dos índices utilizados. Estas tabelas são necessárias para avaliar e ordenar os elementos de risco quando comparados entre si.

Tabela 5.5 Classificação dos elementos de risco quanto à probabilidade de ocorrência

Índice de frequência	Ocorrência	
	Categoria	Probabilidade de ocorrência num período de 30 anos (%)
1	Raro ou pouco provável	0-10
2	Possível a muito possível	10-50
3	Provável	> 50

Tabela 5.6 Classificação dos elementos de risco quanto à gravidade

Índice de gravidade de consequências	Gravidade	
	Categoria	Descrição
1	Muito baixa a baixa	Sem danos ou com impactes menores e localizados
2	Moderada	Danos moderados para o ambiente
3	Elevada a Muito Elevada	Danos severos a massivos para o ambiente, numa extensa área, irreversíveis a médio prazo

Os índices de ocorrência e de gravidade podem ser apresentados com várias modalidades, no entanto para o caso de estudo da Mina da Freixiosa entendeu-se que a classificação seria adequada com recurso a 3 modalidades cada.

Tabela 5.7 Lista de elementos de risco radiométrico e classificação por índice de gravidade e de ocorrência

Local	Elemento de risco nº	Perigosidade potencial	Factores que aumentam a probabilidade do perigo	Consequências potenciais (ambiente ou segurança)	Índice de gravidade	Evidências no local	Índice de ocorrência
Exploração subterrânea	1.1	Subsidência	Não enchimento das infra-estruturas subterrâneas	Movimentos de terreno com incidências à superfície, rachas em habitações subjacentes à infra-estrutura subterrânea. Aumento da emissão do radão.	1	Trabalhos aterrados com escombro. Sem evidências de subsidências.	1
	1.2	Emissão de radão	Antigas cavidades que favorecem a ascensão do radão à superfície	Contaminação de habitações mal ventiladas e em pisos térreos. Risco para a saúde humana, aumento da incidência de cancro do pulmão.	3	Alguns locais evidenciam elevadas taxas de emissão de radão. Contudo não são áreas construídas.	2
	1.3	Contaminação das águas subterrâneas	Nível freático elevado, circulação da água subterrânea, dispersão de lixiviados.	Contaminação da água subterrânea que pode ser utilizada para consumo humano ou rega.	3	Algumas análises feitas pela EDM mostraram contaminação radiométrica de vegetais regados com água de poços. A ingestão de vegetais contaminados é grave e irreversível.	3
"Céu-aberto" e escombreira	2.1	Dispersão hidráulica a partir de exurgências.	Ventos fortes, cobertura deficiente, ausência de vegetação.	Transporte de partículas radioactivas a grande distância e aumento dos níveis de radioactividade em locais mais afastados. Contaminação de solos, água superficial e águas subterrâneas que interceptam os trabalhos mineiros.	3	Os valores da radiometria de superfície e radiação externa atenuam-se rapidamente com a distância ao "céu-aberto".	2
	2.2	Dispersão superficial de poeiras de minérios radioactivos.	Chuvas intensas, cobertura deficiente, ausência de vegetação, taludes com inclinações superiores a 1,15(v:h).	Transporte superficial de partículas radioactivas ao longo das linhas de drenagem superficial. Contaminação da água superficial e sedimentos.	2	Os valores da radiometria de superfície mostram dispersão superficial. Contudo os valores mais elevados não o são quando comparados com outras minas na região.	1
	2.3	Emissão de radão	Antigas cavidades que favorecem a ascensão do radão à superfície	Contaminação de habitações mal ventiladas e em pisos térreos. Risco para a saúde humana, aumento da incidência de cancro do pulmão.	3	Alguns locais evidenciam elevadas taxas de emissão de radão. Contudo não são áreas construídas.	2
	2.4	Instabilidade dos aterros.	Chuvas intensas, taludes com inclinações superiores a 1,15(v:h)	Escorregamento lento com início no topo do aterro. Dispersão ampla de materiais potencialmente radioactivos.	2	Não há evidências de movimentos de terras nos locais estudados	1

A atribuição de cada um dos índices foi feita com base em medições feitas no decorrer do trabalho de campo. Os níveis mais elevados foram atribuídos à emissão de radão, dispersão hidráulica a partir de exsurgências.

Outro problema de contaminação radioactiva muito relevante, mas que não foi abordado neste estudo, está relacionado com a água subterrânea e o seu uso para rega. Efectivamente, as análises efectuadas pela EDM mostram que este uso da água potencialmente contaminada poderá ter consequências na acumulação de radionuclídeos em vegetais e por isso deverá ser investigado em futuros estudos ao local.

No extremo oposto encontram-se as subsidências, que não ocorreram em 24 anos e por isso apresentam risco baixo.

Em seguida apresenta-se uma tabela que relaciona os diferentes índices de ocorrência e gravidade, perfazendo 9 combinações entre si.

Tabela 5.8 Matriz dos elementos de risco radiométrico para a Mina da Freixiosa

Ocorrência	Provável	3			1.3
	Pouco possível	2			1.2; 2.1; 2.3
	Raro	1	1.1	2.2; 2.4	
			Muito baixo a baixo	Médio	Elevado a muito elevado
			1	2	3
			Gravidade		

Dos 9 elementos de risco analisados, de acordo com as 9 combinações possíveis, 3 apresentam um risco baixo, outros 3 apresentam um risco médio e apenas 1 apresenta um risco elevado, que por sinal corresponde ao único elemento não analisado no presente estudo. Através desta análise pode-se concluir que a Mina da Freixiosa apresenta um nível de intervenção intermédio, tal como classificado pela EDM, sendo a proximidade à população a principal responsável para a existência de risco.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo, aplicado à área de uma antiga mina de minérios de urânio (Mina da Freixiosa), permitiu aplicar e validar uma metodologia de caracterização da radioatividade ambiente e análise de risco do local, na componente da radiação externa, adoptada pela EDM e que se afigura promissora para futuras utilizações em situações similares.

Na Mina da Freixiosa, os locais à superfície, tidos como mais problemáticos do ponto de vista ambiental e fontes de contaminação, são o antigo “céu aberto” (aterrado com escombros de baixa radioatividade) e uma escombreira. Em subterrâneo existiram uma rede de galerias, que entretanto foram cheias com enchimento hidráulico.

Estes dois locais à superfície foram alvo de anteriores campanhas de amostragem, de radiometria de superfície e radiação externa, levadas a cabo pela EDM no âmbito da caracterização dos locais das antigas minas abandonadas. Em 2004 as medições foram feitas nas áreas imediatamente subjacentes a estes dois locais e, em 2007, foram avaliadas as áreas adjacentes.

Ao desenvolver este estudo, e ao consultar a informação disponível das anteriores campanhas, a primeira conclusão é que para levar a cabo uma análise de risco do local, mesmo que só sobre a componente da radioatividade ambiente, era essencial proceder a nova campanha de amostragem das mesmas medições (radiometria de superfície e radiação externa), mas sobre uma área mais abrangente. Para proceder às respectivas análises estatísticas de correlação, decidiu-se que as medições de radiometria de superfície e radiação externa seriam feitas nos mesmos locais, e que algumas seriam coincidentes com as anteriores campanhas.

Estes trabalhos de campo foram planeados e executados durante a primeira metade de 2008. Também, e porque ainda não tinham sido feitas medições de emissão de radão do solo neste local, aproveitaram-se os trabalhos de campo para incluir as medições de emissão de radão do solo.

A análise de todas as medições disponíveis de **radiometria de superfície**, provenientes das anteriores campanhas de 2004 e 2007, e os trabalhos de campo desenvolvidos em 2008, permitiu retirar as seguintes conclusões:

- As medições de radiometria de superfície, nomeadamente com o aparelho SPP2, são instantâneas e por isso muito expeditas;
- As medições de radiometria de superfície têm carácter pontual. Por isso, a principal vantagem destas medições é capturar os comportamentos e heterogeneidades espaciais à escala de pormenor, mas como a radiação dispersa-se em várias direcções e atenua-se com a distância, do ponto de vista do cálculo da dose e análise de risco têm pouca utilidade. Por estas razões, foram e são muito utilizadas na prospecção mineira e são pouco utilizadas para estudos ambientais.
- No que se refere ao caso de estudo propriamente dito, as medições obtidas permitiram confirmar que o “céu aberto”, a escombreira e respectivas envolventes são os locais potencialmente mais problemáticos, registando-se os valores mais elevados. Na escombreira, e em comparação com o “céu-aberto”, foram observados os valores mais elevados, superiores a 1000 cps. Todos os valores obtidos são sempre da mesma ordem de grandeza nas três campanhas (2004, 2007 e 2008), desde que nos mesmos locais, o que mostra que não se observou atenuação natural neste curto período de tempo.
- Confirmando o carácter pontual das medições de radiometria de superfície, a ferramenta geoestatística de análise de continuidade espacial variograma, permitiu observar com fiabilidade que o espalhamento dos materiais no “céu aberto”, pelos menos na última camada, foi feito na direcção de maior desenvolvimento NE-SW, e que a deposição na escombreira não seguiu qualquer padrão em especial.
- As imagens estimados da radiometria de superfície mostram claramente que existe dispersão de material radioactivo no sentido das linhas de água, sendo esta dispersão mais evidente no “céu aberto”. Nas imediações da escombreira, a Norte, foram observados valores anómalos da mesma ordem de grandeza do que os encontrados sobre a escombreira, podendo ser derivados de outras deposições de escombros, utilização de águas contaminadas na rega ou então o afloramento de uma estrutura mineralizada. Esta última afigura-se como mais provável mas este facto deve ser investigado em trabalhos futuros.

Já a análise das medições disponíveis de **radiação externa**, provenientes das anteriores campanhas de 2004 e 2007, e os trabalhos de campo desenvolvidos em 2008, permitiu retirar as seguintes conclusões:

- As medições da radiação externa são medições feitas com o equipamento posicionado à altura de um metro, e são leituras médias de um período de tempo não instantâneo (100 segundos nas medições levadas a cabo). Por isso, comparativamente com as medições de radiometria de superfície, são mais atenuadas mas mais adequadas para o cálculo da dose e análise de risco.
- Permitem identificar as zonas de intervenção prioritárias e zonas de anomalias naturais (filões).
- A utilização de fórmula adequada com a calibração do aparelho permitiu calcular os valores da dose absorvida em cada local. Os únicos locais onde os valores ultrapassam 0,5 $\mu\text{Gy/h}$, de forma não pontual, são os locais já identificados como mais problemáticos o “céu aberto” e principalmente a escombreira e imediações a Norte, onde foram registados valores próximo de 2 $\mu\text{Gy/h}$.

As imagens da **dose efectiva**, considerando apenas a componente da radiação externa, permitem retirar as seguintes conclusões:

- O valor de fundo natural do local de 1,5mSv/ano;
- Segundo a IAEA, e considerando que o máximo permitido acima do fundo natural do local é de 1 mSv/ano, os locais onde o risco radiológico é significativo (acima de 2,5 mSv/ano) são os esperados “céu-aberto”, escombreira e respectivas envolventes. Segundo este critério, estes locais foram confirmados como problemáticos para todas as campanhas de amostragem.
- Entre estes dois locais considerados como mais problemáticos, a escombreira e imediações será o mais problemático, porque tem os valores mais elevados e porque existem terrenos de cultivo na área imediatamente a jusante.
- Pontualmente, fora da área mineira encontram-se zonas com valores anómalos que correspondem a estruturas mineralizadas.

No que se refere às medições de **emanação de radão do solo**, retiram-se as seguintes conclusões:

- As leituras de emanação de radão permitiram complementar a análise radiométrica do local e caracterizar um importante elemento de risco para a saúde pública;
- Os valores obtidos para a emanação de radão são em geral muito elevados, confirmando-se que é um item presente e com alguma perigosidade para a saúde;
- Os terrenos menos compactados foram os que apresentaram os valores mais elevados, como é o caso dos terrenos cultivados;
- Todas as construções no local devem ter em conta as emanações de radão do solo, embora no presente estudo não se tenha levado a cabo nenhuma campanha de medição no interior das habitações;

Na fase final do trabalho experimental fez-se uma **avaliação qualitativa dos elementos de risco radiométrico** segundo uma matriz que cruza a gravidade com a probabilidade de ocorrência.

Os elementos de risco significativos no local são a **emanação de radão do solo**, a **contaminação da água subterrânea** e a **dispersão hidráulica a partir de exurgências** no “céu-aberto” e escombreira. As áreas que devem ser alvo de atenção prioritária são a **escombreira**, o “**céu-aberto**”, e respectivas envolventes, onde nas imediações desta última se encontram algumas habitações.

A avaliação da água subterrânea não foi alvo de estudo no presente trabalho, tendo-se consultado apenas a informação das campanhas anteriores e detectado algumas zonas agrícolas à superfície como problemáticas (rega com águas potencialmente contaminadas). Este item deverá ser analisado mais exaustivamente em futuros estudos no local, e complementado com análises de vegetais cultivados no local, solos e sedimentos de corrente, que no seu conjunto contemplam todos os compartimentos ambientais no local e contemplam a análise de risco.

Embora alguns impactes ambientais na antiga mina sejam irreversíveis de forma natural à escala temporal humana, é possível minimizar os seus efeitos. A EDM tem previsto a

reabilitação deste local até 2013, sendo que parte dos estudos preliminares já se encontram em curso e onde se inclui o presente trabalho.

Nos trabalhos de reabilitação está prevista a remoção, para depósito confinado, de maciços das fundações de antigos edifícios em ruína, assim como dos materiais da escombreira e da limpeza das áreas adjacentes. O volume de matérias a remover está estimado em cerca de 1.760 m³ (dos quais 889 m³ da escombreira). A área removida é recuperada do ponto de vista paisagístico.

Está ainda prevista a limpeza das lamas acumuladas no fundo da ribeira que drena imediatamente a jusante do “céu-aberto” que será recuperado; instalação de sistema de colecta e drenagem das águas de nascente do “céu-aberto” (estas acções estão condicionadas à autorização dos actuais proprietários dos terrenos); limpeza de solos usados para fins agrícolas que se encontrem contaminados e beneficiação das condições de drenagem do “céu-aberto” (estas acções estão condicionadas à autorização dos actuais proprietários dos terrenos).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brito, M. G. (2005) - Metodologia para a avaliação e remediação da contaminação por metais pesados em áreas industriais degradadas. Tese Doutoramento, Universidade Nova Lisboa, 360 p.

CMRP (1998) – Manual de utilização do geoMS. Lisboa, CMRP-IST.

Costa, L. R. (2003) – Recursos Minerais de Portugal: da Indústria Extractiva à Economia dos Georrecursos, Ingenium 2ª Série, n.º 72, pp. 16-24.

Davis, M. L. & Cornwell, D. A.(1998) – Introduction to Environmental Engineering, McGRAW-HILL, 919 p.

EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro (2007), Caracterizações e projectos nas minas radioactivas, 1º fase (Projecto financiado pelo QCA III).

Falcão, J. M., Carvalho, F. P., Leite, M. M., Alarcão, M., Cordeiro, E., Ribeiro, J., 2005. MINURAR - Minas de urânio e seus resíduos. Efeitos na saúde da população., Relatório INSA, INETI, ITN. Disponível nos sites: <www.itn.pt> e <www.insa.pt>.

Ferreira, A. C. (2008) – Reabilitação de minas Radioactivas absorve 60 milhões de euros até 2013, Água & Ambiente – O jornal de negócios do ambiente 114(2008) 8-10.

Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989) – An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 561 p.

Laurence, D. (2006) – Optimisation of the mine closure process, Journal of Cleaner production, 14, pp. 285-298.

Matos, J. L. (2001) – Fundamentos de informação geográfica, Lidel, Lisboa.

Neiva, J. M. C. (2003) – Jazigos portugueses de minérios de urânio e sua génese, A geologia de engenharia e os recursos geológicos, Vol. 1, pp. 15-76.

Neves, O., Abreu, M. M., Basto, M. J. & Matias, M. J. (1999) – Contribuição para o estudo da contaminação resultante da exploração e abandono da mina de urânio da Cunha Baixa. II. Solos. II Congresso Ibérico de Geoquímica, Lisboa, Actas, pp. 189-192

Neves, L. F. & Pereira, A. (2004) – Radioactividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra, *Geonovas* n.º 18, pp. 103-114.

Oliveira, C. (2006) – A radioactividade e o ambiente no ensino secundário. Tese de mestrado, pp.

Pereira, H. G. (2003) – Lugar e função dos recursos naturais no espaço do conhecimento, *Ingenium* 2ª série, n.º 78, pp. 74-78.

Pilar, L. (1969) – Contribuição para o conhecimento dos minerais de urânio de Portugal metropolitano. J.E.N., Lisboa, 50 p.

J.E.N. - Junta de Energia Nuclear (1968) – A província uranífera do centro de Portugal, (suas características estruturais tectónicas e metalogénicas). Lisboa, 131 p.

Teixeira, C. (1964) – Minérios Radioactivos Existência em Portugal. Edição do centro de estudos de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa (Fundação do instituto de alta cultura).

Raguin, E. (1961) – Géologie des Gites Miéreaux. Masson et C^{ie}, 686 p.

Soares, A. (2000) – Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia: n.º 9. Lisboa: IST Press, 206 p.

Sobreiro, M. J. (2006) – A Indústria Extractiva em Portugal Continental no Período de 2001 a 2005 – Elementos Estatísticos. *Boletim de Minas, Dir. Geral Geol. e Energia*, Lisboa, Vol. 41, n.º 2, pp 187-223.

Vivolo, V. & Caldas, L. V. E. (2005) – Aplicação de metodologia de testes de desempenho de monitores portáteis de radiação. *Revista Brasileira de Física Médica*, Vol 1, n.º 1, pp. 27-37.

7.1 Bibliografia electrónica (accedida durante o período Outubro 2007/Agosto 08)

[1] AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, <http://apambiente.pt>

[2] ARGONNE NATIONAL LABORATORY, EVS, <http://www.ead.anl.gov/pub/doc/natural-decay-series.pdf>

- [3] CIÊNCIAJ, FALANDO DE RADIOACTIVIDADE, <http://www.ajc.pt/cienciaj/n32/ejc1.php>
- [4] COTAÇÕES DE MATÉRIAS-PRIMAS, COTAÇÃO DO URÂNIO, <http://www.investcom.com/moneyshow/uranium.htm>
- [5] DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA. , <http://www.dct.uc.pt>
- [6] DIRECTIVA 2001/928/ EURATOM, ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/legislation/01928_en.pdf
- [7] ENVIRONMENTAL CONTAMINATION FROM URANIUM PRODUCTION FACILITIES AND THEIR REMEDIATION, PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL WORKSHOP LISBON, 11–13 FEBRUARY 2004, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1228_web.pdf
- [8] INETI, INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, <http://ineti.pt>.
- [9] KALIPEDIA, <http://www.kalipedia.com>
- [10] THE PORTUGUESE HEALTH PHYSICS SOCIETY, <http://www.sppcr.online.pt/>.
- [11] THE UX CONSULTING COMPANY, http://www.uxc.com/uxc_uranium-prices.html
- [12] SNIRH, SERVIÇO NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, <http://snirh.pt>
- [13] WISE Uranium Project, <http://www.wise-uranium.org/>
- [14] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, <http://world-nuclear.org>

7.2 Cartas

Carta Geológica n.º 17B de Fornos de Algodres, à escala 1:50 000.

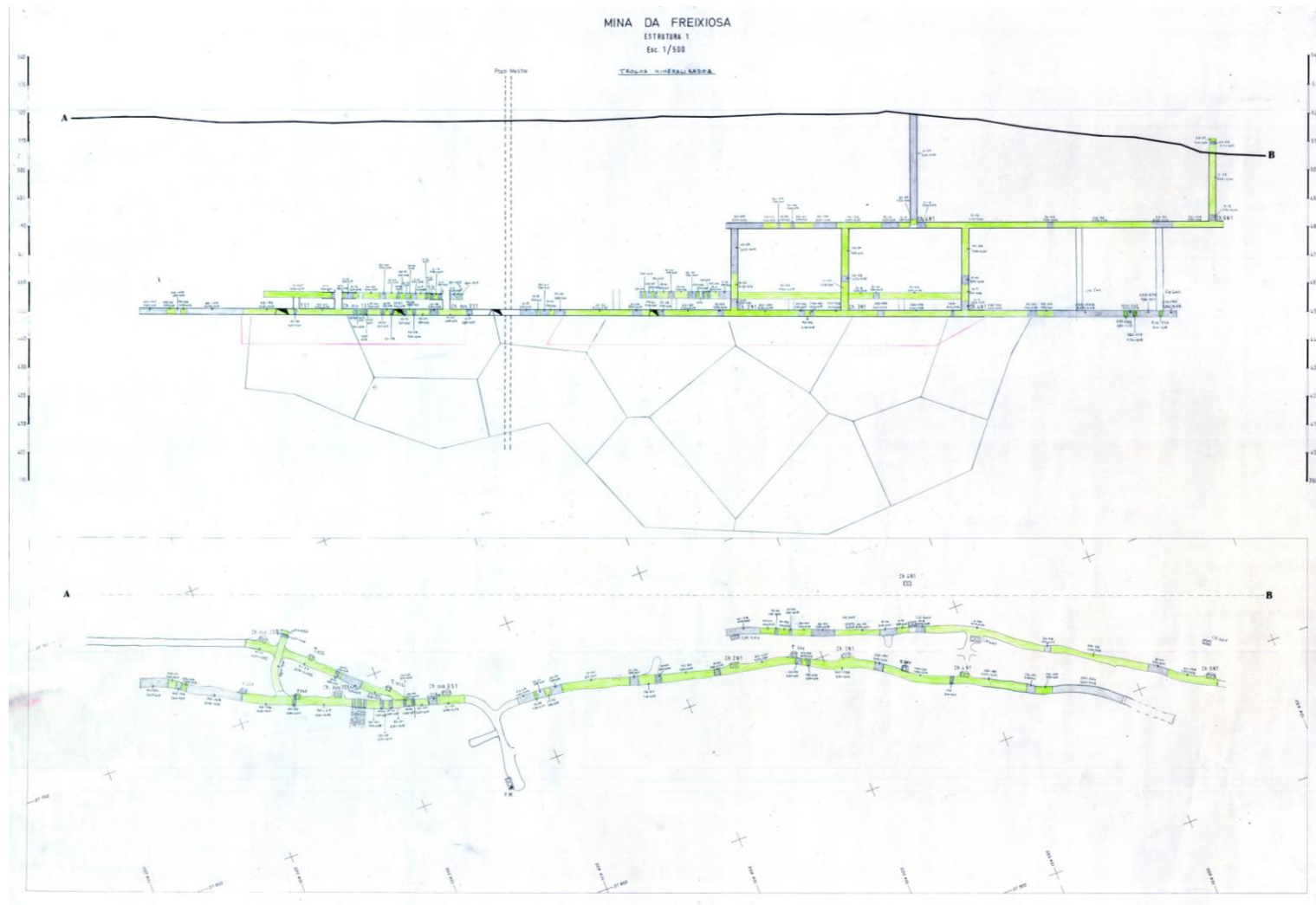
Folha 190 da Carta Militar de Portugal à escala 1:25 000.

ANEXO I - PRODUÇÃO MUNDIAL DAS MINAS DE URÂNIO ENTRE 1998 E 2006 (TONS)

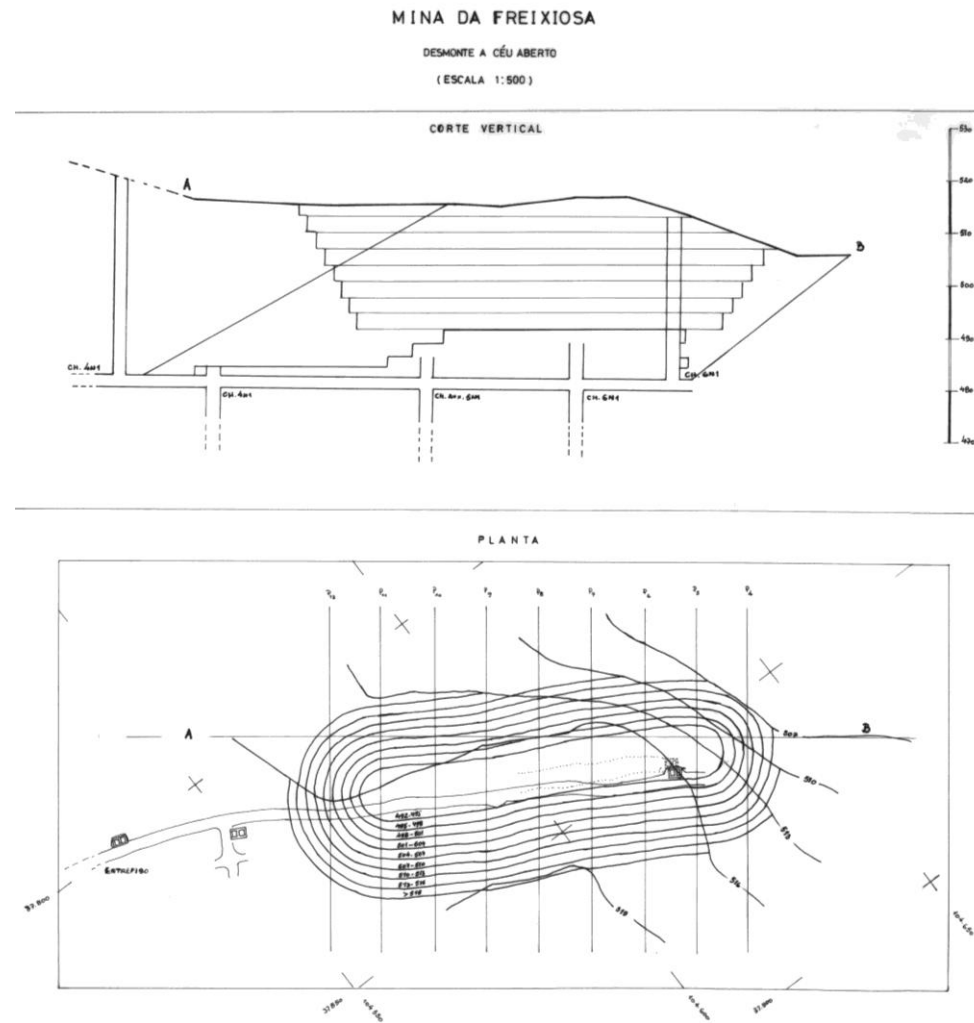
PAÍS	PRODUÇÃO (Tons)									
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2005-06(%)
Argentina	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Arménia	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Austrália	4885	5979	7609	7756	6854	7572	8982	9516	7593	-20
Bélgica	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brasil	0	0	50	58	270	310	300	110	190	73
Bulgária	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canada	10 924	8214	10 590	12 520	11 604	10 457	11 597	11 628	9862	-15
China^	500	500	500	655	730	750	750	750	750	0
Republica Checa	610	612	507	456	465	452	412	408	359	-12
Finlândia	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
França	508	439	320	195	20	9	7	7	0	0
Gabão	731	294	0	0	0	0	0	0	0	0
Alemanha	40*	33*	28*	27*	212*	150*	150*	77*	50*	-35
Hungria	10*	10*	10*	0	0	0	0	0	0	0
Índia^	200	200	200	230	230	230	230	230	230	0
Japão	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Kazaquistão	1074	1367	1740	2050	2800	3300	3719	4357	5279	21
Coreia do Sul	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Lituânia	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
México	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Namíbia	2762	2689	2714	2239	2333	2036	3038	3147	3077	-2
Holanda	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Níger	3731	2918	2900	2920	3075	3143	3282	3093	3434	11
Paquistão^	23	23	23	46	38	45	45	45	45	0
Portugal	19	10	10	3	2	0	0	0	0	0
Roménia^	100	100	50	85	90	90	90	90	90	0
Rússia^	2000	2000	2500	2500	2900	3150	3200	3431	3400	-1
Eslováquia	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Eslovénia	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Africa do Sul	962	981	878	873	824	758	755	674	534	-20
Espanha	255	255	251	30*	37*	0	0	0	0	0
Suiça	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Suécia	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Inglaterra	na	Na	na	na	na	na	Na	na	na	na
Ucrânia^	500	500	500	750	800	800	800	800	800	0
USA	1 872	1 807	1 456	1 011	883	779	878	1 039	1 692	63
Urzasquistão	2 000	2 130	2 350	1 962	1 860	1 589	2 016	2 300	2 270	-1
Total	33 728	31 065	35 186	36 366	36 027	35 622	40 251	41 702	39 655	-5

Fonte: World Nuclear Association - WNA

Legenda: ^ - estimado UI/WNA; na – não aplicável; * - de desmantelamento.



(Fonte: EDM)



(Fonte: EDM)