Universidade de Aveiro
2021

Departamento de Geociências

Maria Carolina Pinto Macedo

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIOATIVIDADE NATURAL EM ÁGUAS PARA CONSUMO HUMANO NA REGIÃO DE AMARANTE

Universidade de Aveiro
2021

Departamento de Geociências

Maria Carolina Pinto Macedo

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIOATIVIDADE NATURAL EM ÁGUAS PARA CONSUMO HUMANO NA REGIÃO DE AMARANTE

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Eduardo Anselmo Ferreira da Silva, Professor do Departamento de Geologia da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente	Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina professor auxiliar da Universidade de Aveiro
orientador	Prof. Doutor Eduardo Anselmo Ferreira da Silva professor catedrático da Universidade de Aveiro
arguente	Prof. Doutor Jorge Manuel Espinha Marques professor auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

agradecimentos

Apesar de uma dissertação, pela sua finalidade académica, ser um trabalho individual, existem contributos que não podem deixar de ser referidos. Por essa razão aqui expresso os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, Professor Doutor Eduardo Anselmo Ferreira da Silva, pela disponibilidade, apoio e compreensão que sempre demonstrou.

Às melhores companheiras do 2º Esq e da vida no geral, Cate e Kikita, por estarem sempre presentes. Obrigada por todas as aventuras e por todos os bons momentos que passamos nos últimos anos. Acima de tudo, obrigada pela amizade que construímos.

A todos os meus coleguinhas de GEOAP com quem aprendi e cresci tanto e que tornaram os últimos anos incríveis.

À Inês e ao Tiago por me acolherem como ninguém. Obrigada por tudo, sem vocês não tinha conseguido.

A todos aqueles com quem partilhei bons momentos e que fizeram da minha passagem pelo Porto e por Aveiro uma experiência que jamais esquecerei.

Ao Rui por ser a melhor pessoa do mundo e me aturar todos os dias. Obrigada por nunca teres deixado de acreditar em mim, até nas alturas em que já nem eu acreditava.

Por último, à minha família por todo o apoio dado ao longo deste ano.

Aos meus pais, pelo amor, carinho e apoio incondicional, por me encorajarem a ser sempre melhor e por acreditarem em mim.

À Bea, a melhor irmã do mundo, obrigada por seres o melhor exemplo que poderia ter. Sem ti não era a mesma coisa.

Um grande Obrigada a todos…

Palavras-Chave Radioatividade Natural, Radionuclídeos, Água Superficial e Subterrânea, Amarante.

Resumo

O radão, um gás radioativo incolor, inodoro e insípido que é solúvel na água, é resultante do decaimento radioativo do urânio e o tório, elementos que estão naturalmente presentes nas rochas e no solo.

A radioatividade natural é considerada a principal fonte de exposição à radiação para o Homem. Esta é uma problemática que a nível continental, afeta maioritariamente as regiões do norte e centro de Portugal, devido à sua litologia.

A região de Amarante, situada a norte de Portugal, encontra-se localizada numa zona onde geologicamente afloram rochas graníticas com concentrações elevadas de urânio e tório como resultado da presença de minerais acessórios como uraninite, torianite e torite. A presença destes elementos contribui para que a região apresente um elevado fundo radiológico natural e um elevado risco de exposição ao gás radão.

De acordo com a informação consultada constata-se que os valores da dose absorvida, medidos para as rochas granitóides da região são superiores à média crustal, sendo igualmente superiores aos observados em diversas litologias análogas da Zona Centro Ibérica (ZCI) (0,24 a 0,32 žGy/h). Em fraturas do granito de Amarante observaram-se algumas anomalias radiométricas, de intensidade moderada, com registo máximo de 420 žGy/h, a que correspondeu teor de U de 26 mg kg^{-1}.

A presença de radionuclídeos naturais nas águas destinadas ao consumo humano é um fenómeno usual, que requer prevenção e controlo. As análises de amostras de água subterrânea, efetuadas para a radiação alfa total, beta total e radão, revelam valores que superam os valores limite referenciados pela União Europeia (EU) de 1000 Bq/L, realçando a importância da fracturação regional e do teor de U nas rochas como fonte dos radionuclídeos presentes nas águas. A ingestão continuada e prolongada de água com baixas doses de radiação pode constituir perigo para a saúde.

Não obstante o potencial radiométrico dos granitos do norte de Portugal ser bastante variável, no caso da região de Amarante os valores de radão estão acima do limite máximo admissível pela legislação nacional, apontando para um risco moderado a elevado de

exposição a este gás.

O trabalho realizado no âmbito da elaboração desta dissertação constitui uma revisão bibliográfica sobre a radioatividade, uma análise e tratamento de dados fornecidos pela Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos dos níveis de concentração do gás radão nas águas utilizadas para consumo da região, e uma comparação com estudos realizados no passado, tendo como principal objetivo a avaliação da potabilidade da água utilizada para consumo no município.

Keywords Natural Radioactivity, Radionuclides, Surface and Groundwater, Amarante.

Abstract

Radon is a colorless, odorless, and tasteless radioactive gas that is soluble in water. It results from the radioactive decay of uranium and thorium, elements that are naturally present in rocks and soil.

Natural radioactivity is considered the main source of radiation exposure for humans. This is a problem that, at a continental level, mainly affects the northern and central regions of Portugal, due to its lithology.

The Amarante region, located in the north of Portugal, is geologically characterized by the presence of granitic rocks outcrop with high concentrations of uranium and thorium due to the presence of accessory minerals such as uraninite, thorianite and thorite. These elements contribute to the high natural radiological background and a high risk of exposure to radon gas.

According to the available information, the absorbed dose values measured for the granitoid rocks of the region are higher than the crustal average, being also higher than those observed in several similar lithologies of the Central Iberian Zone (ZCI) (0.24 to 0.32 žGy/h). In fractures of the Amarante granite, some radiometric anomalies of moderate intensity were observed, with a maximum of 420 žGy/h, corresponding to a U content of 26 mg kg^{-1}.

The presence of natural radionuclides in water used for human consumption is a usual phenomenon, which requires prevention and control. Analysis of Amarante groundwater samples, carried out for total alpha radiation, total beta radiation and radon, reveal values that exceed the European Union (EU) limit values of 1000 Bq/L, highlighting the importance of regional fracturing and the U content in rocks as a source of radionuclides present in water. The long-term ingestion of water with low radiation doses may constitute a health hazard.

Although the radiometric potential of granites in northern Portugal is quite variable, in the case of the Amarante region, the radon values are above the maximum limit allowed by national legislation, pointing to a moderate to high risk of exposure to this gas.

The work developed within this dissertation consisted of a bibliographic review on radioactivity activity, an analysis and a treatment of data provided by the Regulatory Entity of Water and Waste Services on the

concentration levels of radon gas in water used for consumption in the region, and a comparison with studies developed in the past, with the main objective of evaluating the potability of the use used for consumption in the Amarante region

Índice

Índice de Figuras iii

Índice de Tabelas v

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO 1

1.1. Estrutura da dissertação 2

CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE 3

2.1. História da Radioatividade 3

2.2. Tipos de Radiação 3

2.2.1. Radiações Não-Ionizantes 4

2.2.2. Radiações Ionizantes 4

Radiação Alfa (α) 4

Radiação Beta (β) 4

Radiação Gama (γ) 5

2.3. Fontes de Radiação 5

2.3.1. Fontes Naturais de Radiação 6

Radiação Cósmica 6

Radiação Terrestre 6

Radiação Interna 7

2.3.2. Fontes Artificiais de Radiação 7

2.4. Unidades Radiológicas 7

2.5. Decaimento Radioativo 8

2.6. Radão 9

2.6.1. Séries de Decaimento 9

2.6.2. Fatores que Influenciam a Concentração de Radão 11

Características Litológicas 11

Características do Solo 12

Características Climáticas 13

2.6.3. Efeitos da Exposição ao Radão na Saúde Humana 13

2.6.4. Enquadramento Normativo 14

CAPÍTULO 3: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 18

3.1. Enquadramento Geográfico 18

3.2. Enquadramento Geomorfológico 18
3.3. Enquadramento Geológico 19
3.4. Enquadramento Climático 22
3.5. Recursos Hídricos 24
CAPÍTULO 4: RADIOATIVIDADE NA REGIÃO DE AMARANTE 25
4.1. Enquadramento Radiométrico a Nível Europeu e Nacional 25
4.2. Enquadramento Radiométrico na Região de Amarante 27
CAPÍTULO 5: METODOLOGIA 31
CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS 40
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41

Índice de Figuras

Figura 1 - Variedade de ondas eletromagnéticas (extraído de https://www.uib.no/en/hms-portalen/75292/electromagnetic-spectrum). 3
Figura 2 - Poder de penetração dos diferentes tipos de radiação (extraído de https://telgurus.co.uk/what-is-the-difference-between-alpha-and-gamma-radiation/). 5
Figura 3 - Distribuição percentual das principais fontes de radiação (extraído de USEPA). 6
Figura 4 - Série de decaimento do Urânio-238 (a) Urânio-235 (b) e respetivos tempos de semivida (extraído de Joint Research Centre (2019)). 10
Figura 5 - Série de decaimento do Tório-232 e respetivos tempos de semivida (extraído de Joint Research Centre (2019)). 11
Figura 6 - Influência da permeabilidade do solo na libertação de radão (extraído de https://radonremoval,net/radon/foundation.materials). 13
Figura 7 - Controlo da qualidade radiológica da água para consumo humano (adaptado de Eurofins, 2016). 16
Figura 8 - Mapa de Portugal Continental mostrando a localização do município de Amarante (à esquerda); mapa do concelho de Amarante e as diferentes freguesias em que se encontra dividido (extraídos de https://pt.wikipedia.org/wiki/Amarante_(Portugal) e https://www.cm-amarante.pt/, respetivamente). 18
Figura 9 - Mapa Hipsométrico do Concelho de Amarante (extraído de https://www.cm-amarante.pt/). 19
Figura 10 - Mapa geológico simplificado da região de Amarante (modificado a partir das Cartas Geológicas 10-A- Celorico de Basto e 10-C- Peso da Régua, Martins et al., 2010). 20
Figura 11 - Imagens de eletrões retrodifundidos dos minerais acessórios obtidos pela ME: a) alanite (Aln), zircão (Zrc), apatite (Ap), monazite (Mnz), uraninite (Urn); b) torianite (Tht), zircão (Zrc) e monazite (Mnz); c) torite (Th); d) espectro da uraninite; e) espectro da torianite; f) espectro da torite (Martins et al., 2013a). 21
Figura 12 - Diferentes tipos de clima existentes em Portugal Continental segundo a classificação climática de Köppen (extraído de https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/). 22
Figura 13 - Gráfico da temperatura média da normal climática de 1971-2000 da região do Tâmega e Sousa (extraído de http://portaldoclima.pt/pt/). 23
Figura 14 - Bacias hidrográficas do concelho de Amarante (extraído de Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios de Amarante 2016-2020). 24
Figura 15 - Mapa Europeu de taxa de radiação Gama terrestre (extraído de Atlas Europeu da Radiação Natural - disponível em https://healthnews.pt/2020/07/20/atlas-europeu-da-radiacao-natural-novos-mapas-mostram-niveis-de-radiacao-onde-vive/) 25
Figura 16 - Concentração média de radão em 21 países europeus (extraído de Atlas Europeu da Radiação Natural -disponível em https://healthnews.pt/2020/07/20/atlas-europeu-da-radiacao-natural-novos-mapas-mostram-niveis-de-radiacao-onde-vive/). 26
Figura 17 - Carta de radiação gama natural de Portugal Continental. A: falha de Régua-Verin; B: falha de Vilariça; C: as unidades do flysch das formações de Mira e Mértola são claramente visíveis

na imagem radiométrica; D: São Pedro do Sul; E: vulcânicas cartografadas com um mesmo comportamento geológico; F: complexo sienítico de Monchique, mostra características geoquímicas diferentes, a E e W uma falha importante; G-complexo básico e ultrabásico de Morais-Vinhais (imagem extraída de Saraiva et al., 1998). 26
Figura 18 - Radioatividade no interior de habitações devida ao radão – estudo realizado pelo ITN (extraído de https://1.bp.blogspot.com/-zJOU96vMedg/VfAJCfeYD3I/AAAAAAAAO-c/vXyatLYCjJ8/s1600/rada%CC%83o-portugal.png). 27
Figura 19 - Carta Geológica de Portugal, escala 1:50000 (Folha 10A – Celorico de Basto), com o município de Amarante delimitado (fonte: www.geoportal.lneg.pt): (1) granito porfiróide de grão grosseiro; com duas micas (Granito de Amarante); (2) Granodioritos porfiroides biotíticos com megacristais muito desenvolvidos segundo (001); (3) Unidade de Vila Nune com tufos vulcânicos ácidos a intermédios; (4) Alternância de filitos e xistos com metassiltitos e metagrauvaques; (5) Formação de Campanhô; (6) Xistos filito-grafitosos e xistos ardosíferos (Formação de Pardelhas - Ordovícico) 28
Figura 20 - Mapa de exposição à radiação gama na região de Amarante (adaptado de Leote e Silva, 1993). 29
Figura 21 - Histograma dos fluxos de radiação gama nas rochas da região de Amarante (fonte: Martins et al., 2010). 30
Figura 22 - Mapa do nível de risco por unidade geológica da concentração de atividade de ^{234}U (a), ^{238}U (b), ^{222}Rn (c), ^{226}Ra (d) e com o concelho de Amarante assinalado. 34
Figura 23 - Mapa do nível de risco por unidade geológica da concentração de atividade de ^{210}Po com o concelho de Amarante assinalado. 35
Figura 24 - Representação esquemática dos parâmetros radiométricos efetuados (adaptado de Martins et al., 2013b). Amostras: (1) Granito de Amarante-AT1; (2) Granito de Amarante – AT2: (3) Metassedimento; (4) Granito de Amarante – AT1- Falha N10°W; (5)) Granito de Amarante – AT1- Falha N30°-40°W; (6) Granito de Amarante – AT1- Falha N50°E; (7) Granito de Amarante – AT1- Falha N60°W 37
Figura 25 - Parâmetros radiológicos (radão, α e β totais) em águas subterrâneas e águas superficiais da região de Amarante (adaptado de Martins et al., 2013b). 38

Índice de Tabelas

Tabela 1. Valores do Fator de Qualidade Efetivo (Q) para os diversos tipos de radiação - ICRP 26 (1977). 8
Tabela 2. Grandezas e Unidades de Radiação. 8
Tabela 3. Algumas propriedades do 222Rn (Cothern e Smith, 1987). 9
Tabela 4. Concentrações médias de U em algumas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (adaptado de Coelho, 2006). 12
Tabela 5. Concentrações de referência para a radioatividade em água potável (Diretiva C7-0105/12 Comissão Europeia). 15
Tabela 6. Valores paramétricos na água destinada ao consumo humano (Decreto-Lei nº 23/2016 de 3 de junho). 15
Tabela 7. Parâmetros radiométricos registados nas diferentes litologias de Amarante (Martins et al., 2013a). 28
Tabela 8. Critérios para a determinação do nível de risco por unidade geológica. 33
Tabela 9. Critérios de ponderação utilizados para o cálculo dos níveis de risco. 33
Tabela 10. Nível de risco estimado por concelho e por parâmetro (tabela extraída do Relatório de Monitorização da Radioatividade em Água para Consumo Humano em Portugal Continental: Avaliação do Risco, elaborado pelo Laboratório de Radioatividade Natural (2020)). 35
Tabela 11. Dados referentes à região de Amarante nas análises realizadas pela ERSAR em 2019 e 2020. 36
Tabela 12. Parâmetros radiológicos (Rn, αTotal e βTotal) em águas subterrâneas das regiões de Amarante. 38

Capítulo 1: Introdução

A radioatividade natural existente no meio ambiente é considerada a maior fonte de exposição radioativa para os seres humanos.

Os materiais geológicos contêm pequenas quantidades de elementos químicos capazes de emitirem radioatividade natural. Um dos elementos que mais contribui para a emissão de partículas radioativas é o radão. Cerca de 50% da totalidade da radiação natural a que a população mundial está sujeita é proveniente da radioatividade emitida por este gás (Manikandan et al., 2002). Na natureza existem 32 isótopos deste elemento radioativo (Wiegand, 2001). Os que têm maior importância são o actinão (^{219}Rn), o torão (^{220}Rn) e o radão (^{222}Rn), produtos resultantes das cadeias de decaimento do Urânio e do Tório.

O ^{222}Rn encontra-se naturalmente presente no ambiente e pode ser facilmente inalado sem ser percetível, uma vez que é um elemento químico gasoso, incolor e inodoro (Gray et al., 2009). Este gás nobre é libertado para a atmosfera a partir do solo e dos materiais de construção sendo posteriormente disseminado pelos aerossóis. Estes aerossóis contaminados irradiam o tecido pulmonar aumentando a possibilidade de o ser humano contrair cancro do pulmão (Celik et al., 2008).

Uma vez que todas as rochas contêm urânio, umas mais do que outras, e dependendo da quantidade desse elemento e da contribuição de fatores geogénicos, climáticos e antropogénicos, ocorre uma exposição ao radão no ar, especialmente no interior das habitações, e também através da água.

Por se encontrar localizada numa zona onde a geologia é composta maioritariamente por rochas graníticas, com concentrações relativamente elevadas de urânio e tório, resultantes da presença de minerais acessórios como uraninite, torianite e torite, o concelho de Amarante apresenta um elevado fundo radiológico natural e um elevado risco de exposição ao gás radão.

Como a população deste município utiliza com frequência os fontanários existentes dispersos por todo o concelho como fonte de abastecimento, e sendo a água proveniente do subsolo podendo observar-se a ocorrência de radionuclídeos naturais na mesma, é necessária uma monitorização regular das suas concentrações para verificar se estas se encontram abaixo dos limites estabelecidos pela legislação.

A radioatividade é um tema ainda pouco desenvolvido em Portugal, e sendo este assunto dos mais polémicos e problemáticos, a maioria das pessoas desconhece em primeiro lugar a sua existência e em segundo lugar os seus verdadeiros efeitos, quer a nível ambiental quer a nível da saúde.

É cada vez mais necessário prevenir o público que recebe elevadas exposições associadas ao radão para o risco radiológico em que incorre (Appleton et al., 2011).

Tendo em conta que o concelho possui um historial de em determinados períodos de tempo ter sido imposta a proibição do consumo de água dos fontanários públicos devido às elevadas concentrações de radão da mesma, e existindo escassas informações acerca desta problemática na

região, foi escolhido o tema da presente dissertação com o objetivo principal de avaliar a concentração de radão presente na água subterrânea que é utilizada para consumo pela população do município de Amarante.

1.1. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos principais:

No primeiro capítulo temos presente a introdução e a organização estrutural da presente dissertação.

No segundo capítulo aborda-se o estado da arte, ou seja, toda a pesquisa realizada que se encontra relacionada com o tema da radioatividade: como surgiu, quais os tipos e fontes de radiação existentes, as unidades radiológicas, o decaimento radioativo, e por fim o elemento radão, expondo as suas séries de decaimento, os fatores que influenciam a sua concentração, os efeitos que a sua exposição provoca na saúde e também o enquadramento normativo.

No terceiro capítulo apresenta-se a caracterização da área em estudo, fazendo o enquadramento geográfico, geomorfológico, geológico e climático da mesma, e também se apresenta o levantamento dos seus recursos hídricos.

No quarto capítulo pormenoriza-se a radioatividade da região em estudo, começando por fazer-se um enquadramento radiométrico a nível europeu e nacional, depois faz-se o enquadramento radiométrico da região de Amarante.

No quinto capítulo é apresentada a metodologia seguida, são apresentados os níveis de radioatividade em águas de consumo da região e realiza-se a avaliação dos mesmos.

Por último, no sexto capítulo apresentam-se as considerações finais que se retiraram após a elaboração da dissertação.

Capítulo 2: Estado da Arte

2.1. História da Radioatividade

O termo radioatividade surgiu pela primeira vez em 1896 quando o físico francês Antoine Henri Becquerel colocou filmes fotográficos numa gaveta junto a alguns fragmentos de um mineral que continha Urânio, e quando revelou os filmes descobriu que estes foram afetados pela radiação. O fenómeno foi chamado de radioatividade e ocorre quando energia é libertada de um átomo espontaneamente, sendo medida na unidade denominada por Becquerel (Bq).

Em 1898, Marie Sklodowska-Curie, física e química polaca, interessada neste fenómeno, juntamente com o marido, Pierre Curie, descobriu que à medida que o Urânio libertava radiação ia transformando-se em outros elementos, um dos quais foi chamado de Polónio e o outro foi chamado de Rádio. Um ano mais tarde, Ernest Rutherford, físico e químico neozelandês, utilizou uma tela fluorescente para detetar as radiações do Urânio e descobriu que existiam dois tipos de radiação emitida, aos quais chamou de alfa e beta. Em 1900, Paul Villar, físico e químico francês, ao estudar os elementos Urânio e Rádio, descobriu uma nova forma de radioatividade que não apresentava carga elétrica, sendo designada por radiação gama. Nesse mesmo ano, Becquerel descobriu que as partículas beta são eletrões com alta velocidade.

2.2. Tipos de Radiação

Podemos classificar as radiações como sendo ondas eletromagnéticas que se propagam com uma determinada velocidade e manifestam energia, carga elétrica e magnética variável, que pode ir desde valores pequenos até muito elevados (Davis e Cornwell, 1998). De acordo com a sua capacidade de interação com a matéria, podemos dividir as radiações em dois grupos: radiações não-ionizantes e radiações ionizantes (Figura 1).

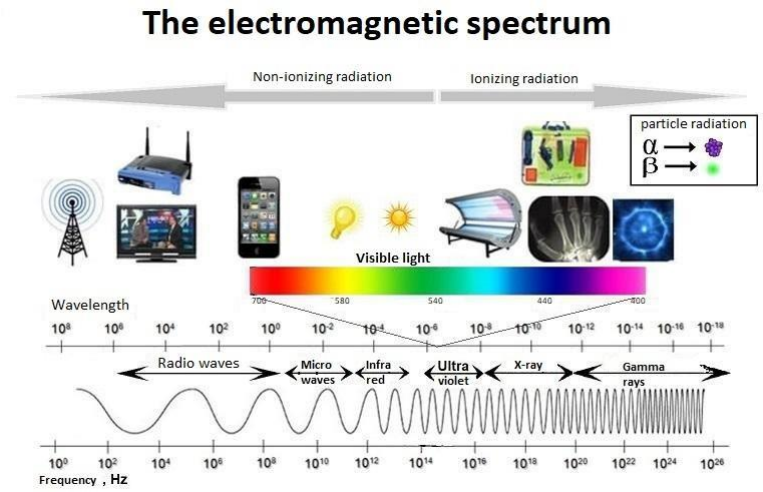

Figura 1 - Variedade de ondas eletromagnéticas (extraído de https://www.uib.no/en/hms-portalen/75292/electromagnetic-spectrum).

2.2.1. Radiações Não-Ionizantes

As radiações não-ionizantes têm energia suficiente para mover átomos de uma molécula, no entanto, não é suficiente para remover eletrões de átomos ou moléculas com as quais interagem, sendo assim incapazes de realizar a ionização. As ondas rádio, a luz visível e as micro-ondas são exemplos deste tipo de radiação (USEPA).

As radiações por ondas de rádio são as que possuem a menor frequência, têm origem em circuitos eletrónicos e são utilizadas em transmissões de rádio e de televisão e ainda em radares. A radiação visível, normalmente designada por luz, é detetada pelo olho humano, e possui comprimentos de onda que variam entes os 400 nm e os 700 nm. As micro-ondas são um tipo de radiação eletromagnética de alta frequência, cujo comprimento de onda vai de 10^{-1} m até 10^{-3} m, têm a capacidade de penetrar facilmente a ionosfera pelo que são adequadas para comunicações via satélite e nos sistemas de RADAR.

2.2.2. Radiações Ionizantes

As radiações ionizantes possuem energia suficiente capaz de ionizar átomos e moléculas com os quais interagem, sendo estas constituídas por radiações alfa, beta, gama e raios X (Jones e Atkins, 2012).

Ao atravessar a matéria, estas radiações transmitem a sua energia cinética aos eletrões podendo provocar assim a ionização ou excitação dos átomos. Cada tipo de radiação tem características própria, as quais influenciam o seu comportamento físico. Para a mesma energia o poder de penetração depende do tipo de radiação.

Radiação Alfa (α)

São partículas energéticas de carga positiva, constituídas por dois protões e dois neutrões ($^{4}_{2}\alpha$). Este tipo de partículas surge da decomposição dos elementos radioativos mais pesados, como o Urânio, o Rádio e o Polónio (USEPA, 2007).

Num determinado meio, partículas alfa de igual energia têm o mesmo alcance, sendo um alcance muito pequeno, não excedendo os 5 cm, o que faz com que sejam facilmente blindadas. Uma simples folha de papel é o suficiente para as absorver, impedindo a sua passagem, já a sua penetração no corpo humano é tão pequena que não consegue atravessar a nossa pele (EPA, 2017a; Guerra, 2014). No entanto, a sua inalação é perigosa para os pulmões e a ingestão é capaz de provocar danos nos tecidos vivos.

Radiação Beta (β)

São partículas de carga negativa ($^{0}_{-1}\beta$), constituídas por eletrões de movimentos rápidos emitidos após o decaimento. Este tipo de partículas é emitido pela maioria dos radionuclídeos naturais como o trítio, o carbono e o estrôncio. Têm maior poder de penetração que as partículas alfa, apesar de ser menos ionizante. A radiação beta pode penetrar no organismo, cerca de 2 a 3 mm, através da pele (USEPA, 2007).

Radiação Gama (γ)

Gerada durante a desintegração dos isótopos instáveis de elementos como o Rádio ou o Urânio, a radiação gama é uma onda eletromagnética que tem um poder de penetração muito grande, embora com um baixo poder ionizante. Este advém de três tipos de interação que pode ter com a matéria: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de um par eletrão-positrão. (Spencer Lima, 2014).

Embora a radiação gama seja a que possui menor poder ionizante, o seu elevado poder penetrante faz com que seja a mais perigosa para o ser humano (Figura 2).

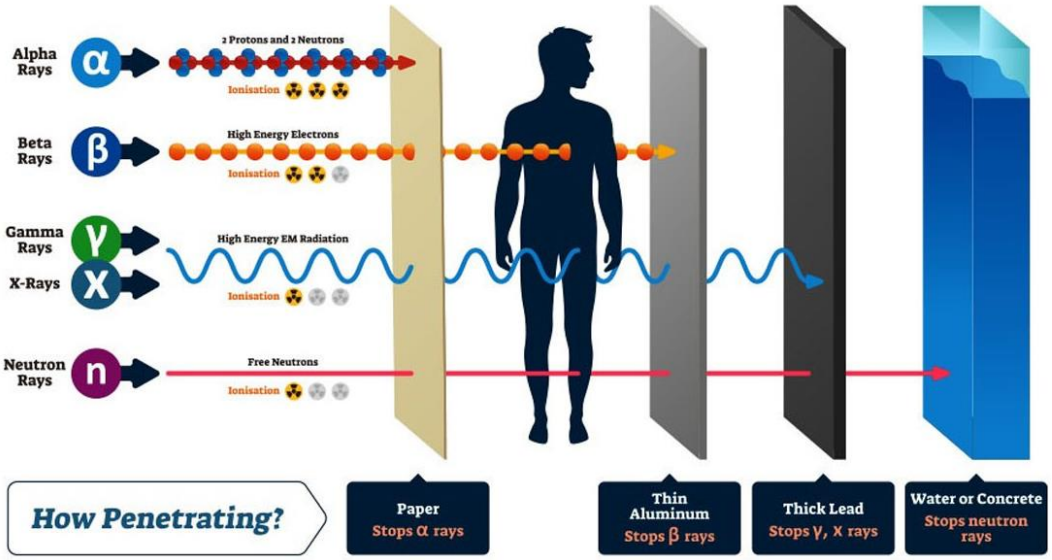

Figura 2 - Poder de penetração dos diferentes tipos de radiação (extraído de https://telgurus.co.uk/what-is-the-difference-between-alpha-and-gamma-radiation/).

Enquanto as radiações α e β são, geralmente, travadas pela superfície da pele, a radiação γ consegue penetrar e, até, atravessar o corpo, causando danos a nível celular por onde passa, o que pode conduzir a uma maior incidência de cancro.

Os raios X, tal como os raios γ, são ondas eletromagnéticas e possuem características semelhantes. A grande diferença entre os dois está na sua origem uma vez que os raios X não são emitidos a partir do núcleo do átomo, mas sim fora do núcleo (EPA, 2017a). Os raios X que são produzidos por fontes naturais são, geralmente, menos penetrantes que os raios γ. O corpo humano é facilmente atravessado por estes raios.

2.3. Fontes de Radiação

Podemos definir radiação como sendo energia transmitida sob a forma de ondas através do espaço ou de um meio material, com uma certa velocidade. As fontes de radiação podem classificar-se em fontes naturais e fontes artificiais, sendo estas últimas resultantes da atividade antropogénica. As

fontes naturais têm uma contribuição mais significativa para a radiação total. (Coch, 1995; Appleton e Ball, 1995).

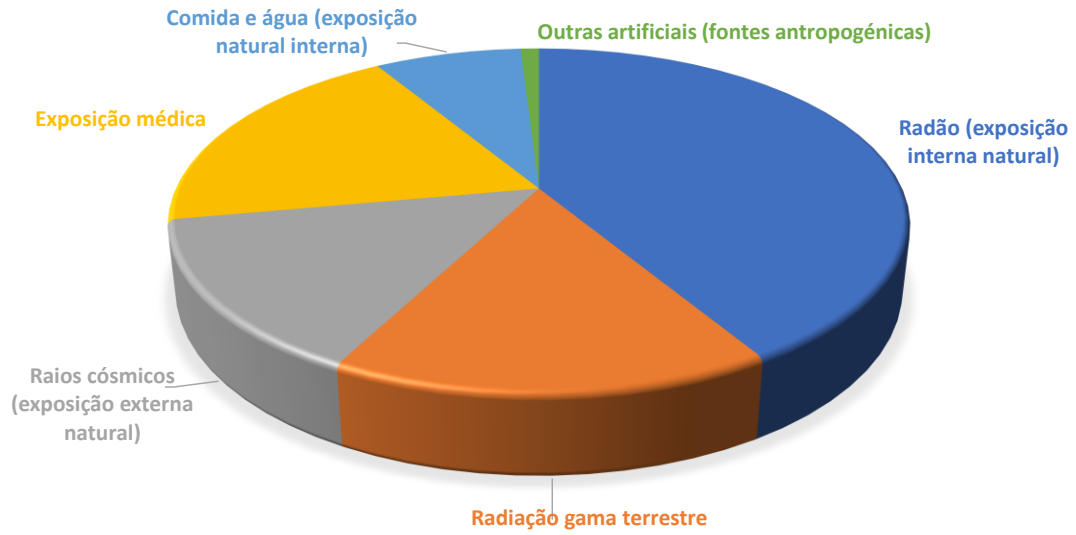

Figura 3 - Distribuição percentual das principais fontes de radiação (extraído de USEPA).

De acordo com Martins (2014) a radiação natural apresenta a maior percentagem da radiação total, com a exposição do radão (43%), radiação gama (15%), raios cósmicos (13%) e a comida e água (8%) perfazendo um total de 79% da radiação total.

Por sua vez, a radiação artificial representa 21% da radiação total e tem origem nas explosões de armas nucleares, centrais nucleares, acidentes em reatores nucleares, tratamento de resíduos perigosos, combustão de combustíveis fósseis, utilização de radioisótopos na medicina, na indústria e na investigação, uso de raios X, aceleradores no radiodiagnóstico, na radioterapia, entre outros.

2.3.1. Fontes Naturais de Radiação

A radiação natural tem origem essencialmente na radiação cósmica, na radiação terrestre, e ainda na radiação interna.

Radiação Cósmica

Uma vez que é um tipo de radiação proveniente do espaço exterior à atmosfera, o seu impacto na superfície terrestre depende da posição geográfica na Terra e da altitude em relação ao nível do mar. A radiação cósmica é menos intensa ao nível do mar, sofrendo um aumento de 100% por cada 2 km de altitude, e é mais intensa nas regiões dos polos do que nas regiões equatoriais.

Radiação Terrestre

Esta radiação representa a radiação que tem origem nas rochas, solos e materiais de construção. É gerada pelo decaimento dos elementos potássio, urânio e tório que se encontram presentes nos

materiais da crusta terrestre. Nestes materiais os isótopos mais relevantes são o ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th e ^{40}K que geram extensas cadeias de decaimento radioativo.

Radiação Interna

Esta radiação é resultante do facto do organismo humano, na sua constituição química, incluir vários isótopos radiogénicos como é o caso do ^{14}C, ^{40}K, ^{137}Cs,^{3}H e todos os descendentes de ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th que na generalidade dos casos são provenientes da dieta alimentar.

2.3.2. Fontes Artificiais de Radiação

A principal fonte artificial de radiação está relacionada com a atividade médica. O Homem utiliza a radiação em alguns meios de diagnóstico como é o caso dos raios X e em algumas formas de tratamento como é o caso da radioterapia. As restantes fontes artificiais de radiação estão associadas com o funcionamento das centrais nucleares para a produção de energia ou com atividades militares nos testes e equipamentos nucleares.

2.4. Unidades Radiológicas

As unidades radiológicas podem ser expressas em atividade (A), dose absorvida (D) e dose equivalente (H):

A **atividade de um radionuclídeo (A)** é expressa pelo quociente entre o número médio de transformações nucleares espontâneas e o intervalo de tempo decorrido. Matematicamente é dada por:

$$A = \frac{dN}{dt} \qquad (Bq = s^{-1})$$

Onde, *N* é o número de núcleos radioativos contidos na amostra ou material, e t é o intervalo de tempo decorrido.

No Sistema Internacional (SI) a sua unidade de medição é o Becquerel (Bq) e corresponde a uma transformação por segundo. Em algumas situações ainda é utilizada a unidade antiga, Curie (Ci) correspondente ao número de transformações nucleares por unidade de tempo de 1 grama de ^{226}Ra, sendo 1 Ci = 3,7 x 10^{10} Bq.

Uma transformação por segundo não significa a emissão de uma radiação por segundo, uma vez que, numa transformação nuclear podem ser emitidas várias radiações de vários tipos e várias energias (IAEA, 2011).

Utilizada para avaliar os efeitos das emissões radiológicas sobre a matéria, a **dose absorvida (D)** é a quantidade de energia que é efetivamente absorvida por unidade de massa de material sujeito à radiação ionizante. A dose absorvida é medida em *rad* (Radiation Absorbed Dose) no entanto, no SI é expressa em J/kg denominado por gray (Gy). Um rad é equivalente a 10^{-2} Gy (IAEA, 2011).

A **dose equivalente (H)** é uma medida da dose de radiação num tecido, ou seja, é a unidade que quantifica a dose de radiação num tecido humano relacionada com os danos biológicos causados, tendo em consideração diferentes fatores como o tipo de radiação ionizante, a energia e a

distribuição no tecido humano. A dose equivalente é obtida multiplicando-se a dose absorvida (D) pelos fatores de qualidade N e Q, ou seja,

$$H = D \times Q \times N \quad (J.kg^{-1} = sievert = Sv)$$

A unidade antiga da dose equivalente denominava-se de *rem* (roentgen equivalent men), sendo que 1 Sv = 100 rem (IAEA, 2011). O fator de qualidade N permite avaliar a influência de um radioisótopo depositado internamente, sendo o seu valor utilizado de 1. O fator de qualidade Q é adimensional e constitui um fator de peso proveniente da simplificação dos valores da Eficácia Biológica Relativa *(Relative Biological Effectiveness, RBE)* dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado efeito biológico.

Na prática, por uma questão de simplicidade, utiliza-se o valor médio do Fator de Qualidade Q, com valores efetivos conforme a Tabela 1. Contudo, estes valores não devem ser utilizados para avaliar os efeitos de exposições acidentais com altas doses e até mesmo experimentos em Radiobiologia.

Tabela 1. Valores do Fator de Qualidade Efetivo (Q) para os diversos tipos de radiação - ICRP 26 (1977).

Tipo de Radiação	**Q**
Raios X, Radiação γ e eletrões	1
Protões e partículas com uma (1) unidade de carga e com massa de repouso maior que uma unidade de massa atómica e de energia desconhecida	10
Neutrões com energia desconhecida	20
Radiação α e demais partículas com carga superior a uma (1) unidade de carga	20

Tabela 2. Grandezas e Unidades de Radiação.

Grandeza	**Unidade Inicial**	**Unidade SI**	**Equivalência**
Atividade (A)	Ci (Curie)	Bq (Bequerel)	1 Ci = 37 G Bq
Dose Absorvida (D)	rad (Radiation Absorbed Dose)	Gy (Gray)	1 Gy = 100 rad
Dose Equivalente (H)	rem (Roentgen Equivalent Men)	Sv (Sievert)	1 Sv = 100 rem

A **dose indicativa (DI)** corresponde, segundo o Decreto-Lei nº 23/2016 de 3 de junho, à dose efetiva comprometida para um ano de ingestão de todos os radionuclídeos cuja presença tiver sido detetada num abastecimento de água destinada ao consumo humano, podendo ser de origem natural como artificial excluindo o trítio, o potássio-40 e o radão como os seus respetivos produtos de vida curta da sua desintegração.

2.5. Decaimento Radioativo

O excesso de energia no núcleo dos átomos torna-os instáveis, o que gera uma desintegração espontânea do mesmo e conduz à formação de novos núcleos de outros elementos químicos mais estáveis. Este processo pelo qual o átomo tende a estabilizar através da emissão de radiação é

denominado por decaimento radioativo, que ocorre muitas vezes, sob a forma de uma série ou cadeia, com certo número de produtos-filho, também radioativos, e termina num isótopo estável.

Enquanto muitos elementos que ocorrem naturalmente possuem isótopos radioativos, apenas o potássio, e as séries de decaimento do urânio e do tório, possuem radioisótopos capazes de produzir raios gama com energia e intensidade suficientes, de forma a serem medidos pela espectrometria de raios gama (IAEA, 2003).

Todos os radionuclídeos emitem radiações à sua própria taxa específica, ou seja, cada substância radioativa possui uma taxa de desintegração específica, a qual pode ser definida pelo termo semi-vida, ou meia-vida, que consiste no tempo necessário para que a concentração dos seus átomos radioativos possa decair para metade.

O decaimento radioativo traduz-se matematicamente pela seguinte expressão:

$$N = N_0 . e^{-\lambda . t}$$

onde:

N = número de radionuclídeos no instante t;

N_0 = número de núcleos radioativos presentes no instante t = 0;

λ = constante de velocidade de decaimento radioativo;

t = tempo (s).

2.6. Radão

O radão (^{222}Rn) é um gás radioativo de origem natural, cujos átomos se desintegram dando origem a outros elementos radioativos tendo como consequência a exposição do Homem a radiações ionizantes. Ocorre nas rochas e no solo, sendo gerado por decaimento do urânio (^{238}U). Contudo, devido ao seu estado gasoso, ocorre também no ar e na água. Em comparação com outros gases nobres, o radão é o mais pesado e solúvel em água. Na tabela 3 seguinte encontram-se expostas algumas das suas propriedades.

Tabela 3. Algumas propriedades do 222Rn (Cothern e Smith, 1987).

Propriedades	Valores
Ponto de ebulição (˚C)	- 61,8
Ponto de fusão (˚C)	- 71,8
Temperatura crítica (˚C)	104
Pressão crítica (atm)	62
Densidade a temperatura e pressão normais (kg/m^3)	9,96

2.6.1. Séries de Decaimento

O radão é o único radioisótopo gasoso conhecido na natureza e está presente nas séries de decaimento do urânio (^{235}U e ^{238}U) e do tório (^{232}Th), sendo descendente direto do rádio (^{223}Ra, ^{226}Ra e ^{224}Ra). O radão pode ser encontrado sob três formas isotópicas naturais, consoante a série

de decaimento que lhe dá origem. Assim, convencionou-se chamar actinão ao radioisótopo ^{219}Rn, descendente direto do ^{223}Ra na série de decaimento do ^{235}U; radão ao ^{222}Rn, descendente do ^{226}Ra, na série de decaimento do ^{238}U; e torão ao ^{220}Rn que descende do ^{224}Ra, na série de decaimento do ^{232}Th.

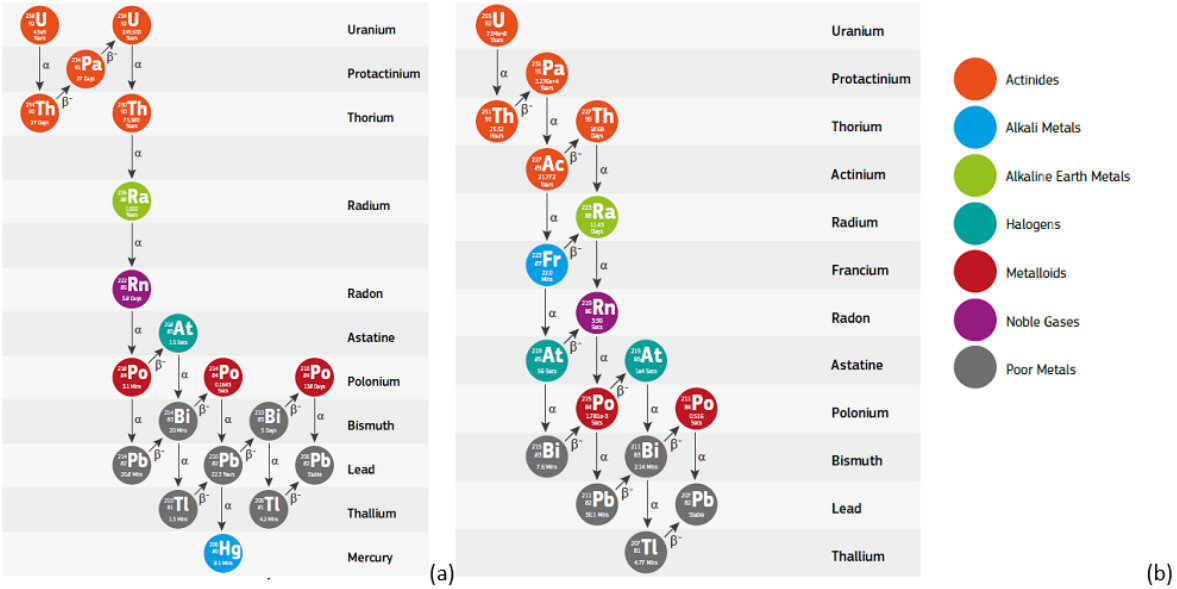

Figura 4 - Série de decaimento do Urânio-238 (a) Urânio-235 (b) e respetivos tempos de semivida (extraído de Joint Research Centre (2019)).

A partir do decaimento do ^{235}U resulta, como se observa na figura 4b, o actinão (^{219}Rn), que possui um tempo de semivida de 3,96 segundos. A sua curta semivida aliada à fraca ocorrência do ^{235}U na natureza (cerca de 0,7% da totalidade dos isótopos de urânio) torna o ^{219}Rn pouco significativo na concentração total dos isótopos de radão na natureza.

A série de decaimento do urânio, representada na figura 4a, tem como início o seu isótopo principal, o ^{238}U. Desta série resulta o radão (^{222}Rn), o único elemento gasoso e apesar de ter um tempo de semivida muito curto, 3,82 dias, decai originando uma série de produtos (^{218}Po, ^{214}Po, ^{214}Bi e ^{214}Pb) que são bastantes preocupantes do ponto de vista de toxicidade devido à emissão de partículas de elevada energia.

Do decaimento do ^{232}Th resulta o torão (^{220}Rn) que possui um tempo de semivida de 55,6 segundos. Tendo em conta a sua curta meia-vida, também ele não atinge a superfície em quantidades significativas, decaindo maioritariamente no substrato para ^{216}Po, a não ser que o substrato apresente concentrações anormais de tório. A série de decaimento do ^{232}Th encontra-se representada na figura 5.

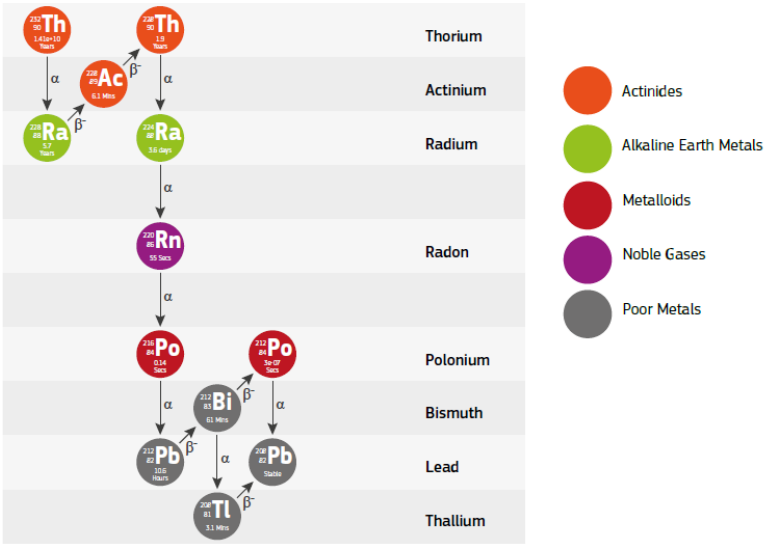

Figura 5 - Série de decaimento do Tório-232 e respetivos tempos de semivida (extraído de Joint Research Centre (2019)).

De entre todos os radioisótopos, o mais importante é certamente o ^{222}Rn, uma vez que é o que possui um maior tempo de semivida e é descendente do isótopo de urânio mais frequente na crusta terrestre.

2.6.2. Fatores que Influenciam a Concentração de Radão

Nem todos os átomos de radão resultantes do decaimento do urânio presente no solo ou nas rochas são libertados e conseguem movimentar-se. Na realidade, o átomo de radão pode sofrer um deslocamento pequeno e permanecer retido na malha do mineral ou da molécula onde se forma, pode sofrer deslocamento, atravessar o poro e ser incorporado no grão adjacente, ou pode ser libertado para os poros existentes na rocha ou no solo (Schumann e Gundersen, 1996).
As características do solo, o tipo de rocha que originou o solo e os fatores climáticos determinam p coeficiente de emanação do radão, ou seja, a fração de átomos libertados para os poros da rocha ou solo (Greeman e Rose, 1996).

Características Litológicas

Uma vez que o radioisótopo ^{222}Rn é o mais importante, e pertencendo ele à série de decaimento do urânio, interessa ter uma ideia da distribuição deste elemento nas rochas da crusta. Esta distribuição não é homogénea, existindo algumas variedades litológicas que apresentam uma concentração superior deste elemento relativamente ao valor médio que para a crusta continental é de 2,8 mg kg^{-1}.

Como podemos observar na tabela 4 as rochas ígneas plutónicas apresentam em geral teores mais elevados de U do que as rochas ígneas vulcânicas.

Tabela 4. Concentrações médias de U em algumas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (adaptado de Coelho, 2006).

Tipo de Rochas		U (mg kg^{-1})
Rochas Ígneas	Ultramáficas	0,01
	Gabros	0,84
	Basaltos	0,43
	Andesitos	2,40
	Sienitos Nefelínicos	8,20
	Granitos	4,80
Rochas Metamórficas	Filitos e Meta-Argilitos	2,50
	Quartzitos e Metagrauvaques	1.50
	Granulitos	1,60
	Mármores	0,50
Rochas Sedimentares	Arenitos	1,40
	Lutitos	3,50
	Rochas Carbonatadas	1,90

Tanto as rochas metamórficas como as rochas sedimentares apresentam, na maioria dos casos, concentrações baixas de urânio, sendo os valores inferiores ao da média da crusta terrestre.

De salientar que existem ainda locais com concentrações anómalas, que são fortemente enriquecidos em urânio, que podem ser objeto de exploração. Normalmente, estas mineralizações surgem associadas a fraturas de rochas graníticas e a falhas.

Características do Solo

Da pedologia, podemos definir solo como sendo qualquer material situado a menos de 2 metros de profundidade e que se encontra em contato com a atmosfera, excetuando os organismos vivos, as áreas de gelo contínuo não cobertas por outros materiais e os corpos de água com mais de 2 metros de profundidade. Se especificado, a definição classificada no World Reference Base for Soil Resources (WRB) pode ainda incluir camadas mais profundas que 2 metros, incluindo rocha contínua, solos urbanos pavimentados, solos de áreas industriais, solos de grutas e solos subaquáticos (FAO, 2014). A sua génese e evolução resultam de diversos fatores, sendo eles o material geológico original, o clima, o relevo, a atividade biológica, o tempo e a influência antrópica.

Fatores como a porosidade, permeabilidade, densidade, tamanho e forma dos grãos influenciam o coeficiente de emanação do gás radão (Schumann e Gundersen, 1996).

A característica que possui maior importância na mobilidade do radão é a permeabilidade. Assim, o risco ambiental do radão é potenciado em regiões onde o substrato rochoso é permeável, podendo apontar-se como exemplos: Zonas de fraturas ou de cisalhamento; Locais com cavidades subterrâneas; Presença de sedimentos permeáveis não consolidados (cascalhos e areias).

Caso o solo possua uma cobertura impermeável, como por exemplo uma camada de argila, a ascensão do radão até à superfície diminui bastante e, consequentemente, existe uma redução do risco ambiental.

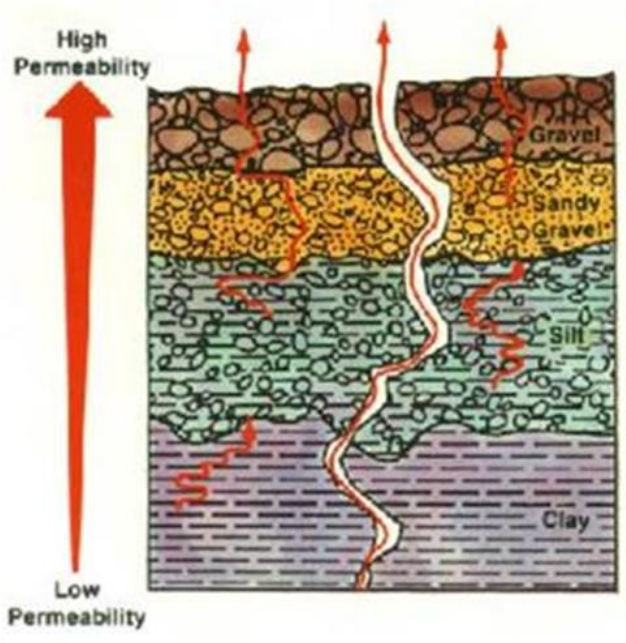

Figura 6 - Influência da permeabilidade do solo na libertação de radão (extraído de https://radonremoval,net/radon/foundation.materials).

Características Climáticas

A circulação de água e de gases naturais (O_2, CO_2, CH_4 e N_2) possibilita o transporte do radão (Etiope e Martinelli 2002). Fatores como o vento (direção e velocidade), variações da pressão atmosférica, percolação de água das chuvas e alteração da temperatura do solo influenciam a movimentação destes gases no solo e consequentemente influenciam a libertação de radão à superfície (Coutinho, 2000).

As temperaturas do ar elevadas estão associadas a correntes convectivas ascendentes o que favorece a exalação e dispersão do radão. Como a dispersão deste gás aumenta, a sua concentração na superfície terrestre diminui (García-Talavera et al., 2001; Singh et al, 2005a). Por outro lado, níveis de humidade elevados inibem a emanação do radão do solo para a atmosfera (García-Talavera et al., 2001). Pelo exposto, é de esperar que em alturas mais secas, como é o caso da época de verão, exista uma maior concentração de radão no solo.

2.6.3. Efeitos da Exposição ao Radão na Saúde Humana

A exposição do Homem a radiações ionizantes pode ser externa, nomeadamente por via da radiação gama expelida pelos materiais geológicos, ou interna, através da inalação ou ingestão dos radionuclídeos contidos no ar, na água ou nos alimentos (Pereira et al., 2003).

O risco radiológico associado ao radão, deve-se sobretudo aos seus descendentes de curto período de semivida. Por si só, o radão pode ser considerado inofensivo, uma vez que grande parte do radão inalado é eliminado após algumas expirações. Contudo, os seus descendentes diretos emissores de
partículas alfa altamente ionizantes, podem ficar retidos no trato respiratório contribuindo assim para a dose interna a que o ser humano está sujeito (Nikezic e Yu, 2002). Os descendentes do radão produzidos no ar atmosférico podem igualmente ser considerados uma fonte de exposição uma vez que têm tendem a formar uma ligação com aerossóis, os quais são posteriormente inalados.

A exposição dos seres vivos às radiações ionizantes provoca quebras nas cadeias do ADN, sendo que, no caso do radão, a inalação deste radionuclídeo e o posterior decaimento para os seus elementos sólidos no interior do organismo, expõe as membranas mucosas dos brônquios a um elevado nível de radiação α com o consequente risco de formação de neoplasias. Estas têm como principal representante o cancro do pulmão (Schmid et al., 2010). O risco de leucemia é restrito aos casos de exposição muito prolongada, como por exemplo, os profissionais com uma carreira muito longa na mineração do urânio no subsolo ou no processamento do urânio (Al Zoughool et al., 2009).

A inalação parece ser o mais importante mecanismo de entrada do radão no organismo, mas não pode ser desvalorizado o contributo da ingestão de elementos radioativos da série de decaimento do ^{238}U. Estes podem afetar diretamente o estômago, mas a bexiga e os rins também podem receber alguma dose (Coelho, 2006).

A Organização Mundial de Saúde classificou o radão como um agente cancerígeno em 1986 (Santos et al., 2014). Sendo este apontado como a segunda principal causa de cancro de pulmão, depois do fumo do tabaco (WHO, 2009).

A USEPA estima que 1 a 3 em cada 100 pessoas que, durante a sua vida, inalem ar com concentrações de radão superiores a 150 Bq L^{-1}, encontram-se sujeitas ao risco de contrair cancro do pulmão. Este risco é significativamente incrementado no caso de fumadores.

2.6.4. Enquadramento Normativo

Tal como foi referido, o ser humano encontra-se exposto ao radão através da inalação, quer do gás em si quer dos seus descendentes, ou por ingestão, nomeadamente através do consumo de água, na qual o radão se encontra dissolvido.

A Diretiva da Comissão Europeia (Tabela 5) foi transposta para a legislação portuguesa através do Decreto-Lei nº 23/2016, de 3 de junho. Esta norma tem como objetivo estabelecer os requisitos para a proteção da saúde pública no que diz respeito à presença de substâncias radioativas na água para consumo humano, definindo os valores paramétricos, frequências e os métodos a aplicar para controlo.

Tabela 5. Concentrações de referência para a radioatividade em água potável (Diretiva C7-0105/12 Comissão Europeia).

Origem	Nuclídeo	Concentração de referência
Natural	U^{238}	3,0 Bq L^{-1}
	U^{234}	2,8 Bq L^{-1}
	Ra^{226}	0,5 Bq L^{-1}
	Ra^{228}	0,2 Bq L^{-1}
	Pb^{210}	0,2 Bq L^{-1}
	Po^{210}	0,1 Bq L^{-1}

O Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de agosto, estabelece o regime de qualidade da água destinada para consumo humano, sendo o seu principal objetivo a proteção da saúde humana dos efeitos nocivos, resultantes de uma possível contaminação dessa água e assegurar a disponibilização de uma água limpa, salubre e com uma composição equilibrada.

O Decreto-Lei nº 23/2016 define o valor paramétrico para substâncias radioativas como sendo o valor acima do qual se deve verificar a sua presença, pois esta representa um risco para a saúde humana, sendo necessário tomar-se medidas de correção para melhorar a qualidade da água e proteger a saúde humana contra as radiações (Tabela 6). Nesta norma foi definido o valor paramétrico para o radão de 500 Bq L^{-1}.

Tabela 6. Valores paramétricos na água destinada ao consumo humano (Decreto-Lei nº 23/2016 de 3 de junho).

Parâmetro	Valor Paramétrico	Unidade de medição
Radão	500	BqL^{-1}
Trítio	100	BqL^{-1}
Dose Indicativa (DI)	0,10	mSv

Quando este valor é excedido é necessário comunicar à Entidade Reguladora dos Serviços da Águas e Resíduos (ERSAR) para serem tomadas medidas corretivas. Relativamente ao trítio foi definido o valor paramétrico de 100 Bq L^{-1} e quando a concentração é muito elevada pode indicar a presença de outros radionuclídeos artificias. Quando se excede este valor têm de se proceder a uma análise para verificar a presença de radionuclídeos artificiais. No que diz respeito ao controlo do radão na água de consumo é necessário determinar a sua origem e captações de água subterrânea em diferentes áreas geológicas.

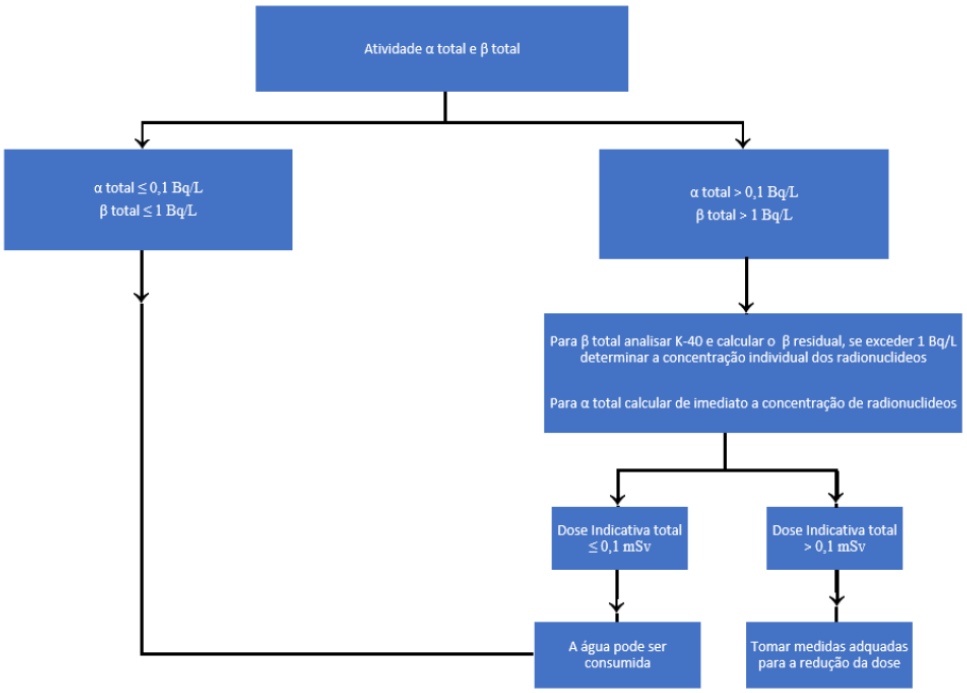

Figura 7 - Controlo da qualidade radiológica da água para consumo humano (adaptado de Eurofins, 2016).

O valor da atividade α-total e β-total é utilizado para controlar o indicador paramétrico da dose indicativa (Figura 7). A metodologia de controlo da radioatividade nas águas de consumo é composta por duas fases. Na primeira fase é realizado o controlo e monitorização das atividades α-total e β-total. O nível de referência para a atividade alfa total é de 0,1 Bq L^{-1}, e para a atividade beta total é de 1,0 Bq L^{-1}. Se a atividade α-total e a atividade β-total forem inferiores ou iguais aos valores de referência, assume-se que a dose indicativa é inferior ao valor parametrizado de 0,1 mSv e que não é necessária investigação radiológica detalhada. Quando os valores de referência são excedidos, passa-se para a realização de uma segunda fase que consiste na investigação das concentrações dos radionuclídeos específicos e comparar os valores de referência para cada um deles (Fernandes et al., 2008).

Se a atividade α-total exceder os 0,1 Bq L^{-1} devem ser verificados os seguintes radionuclídeos específicos: ^{238}U, ^{234}U, ^{226}Ra e ^{210}Po. No caso de a atividade β-total exceder 1,0 Bq L^{-1} deve ser verificada a presença do radionuclídeo ^{40}K, se após a sua determinação a atividade β-residual for superior a 1,0 Bq L^{-1} devem ser verificados os radionuclídeos específicos ^{90}Sr e ^{137}Cs (Decreto-Lei nº 23/2016).

A dose indicativa (DI) é controlada nas águas para consumo humano sempre que esteja presente uma fonte de radioatividade artificial ou uma fonte de radioatividade natural com concentrações elevadas. Quando é necessário controlar os níveis de radionuclídeos naturais a autoridade

competente define a frequência do controlo da atividade alfa total e da atividade beta total ou de determinados radionuclídeos naturais (Decreto-Lei nº 23/2016).

Quando ocorre o incumprimento dos valores paramétricos das substâncias radioativas, a autoridade de saúde deve, no prazo máximo de 5 dias após a tomada de conhecimento, informar as entidades gestoras sobre o possível risco para a saúde humana. Caso se considere que existe risco significativo para a saúde humana a autoridade de saúde e a entidade gestora definem medidas corretivas a adotar. A eficácia das medidas corretivas implementadas deve ser demonstrada através de novas análises de verificação aos parâmetros em incumprimento (Decreto-Lei nº 23/2016).

CAPÍTULO 3: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Enquadramento Geográfico

Amarante é um concelho que pertence ao distrito do Porto, estando assim localizado na região Norte de Portugal. Desde a reorganização administrativa de 2012/2013, o município encontra-se divido em 26 freguesias que ocupam uma área com cerca de 301,33 km^2 e, de acordo com os dados recolhidos nos Censos 2011, possui cerca de 56264 habitante (Figura 8).

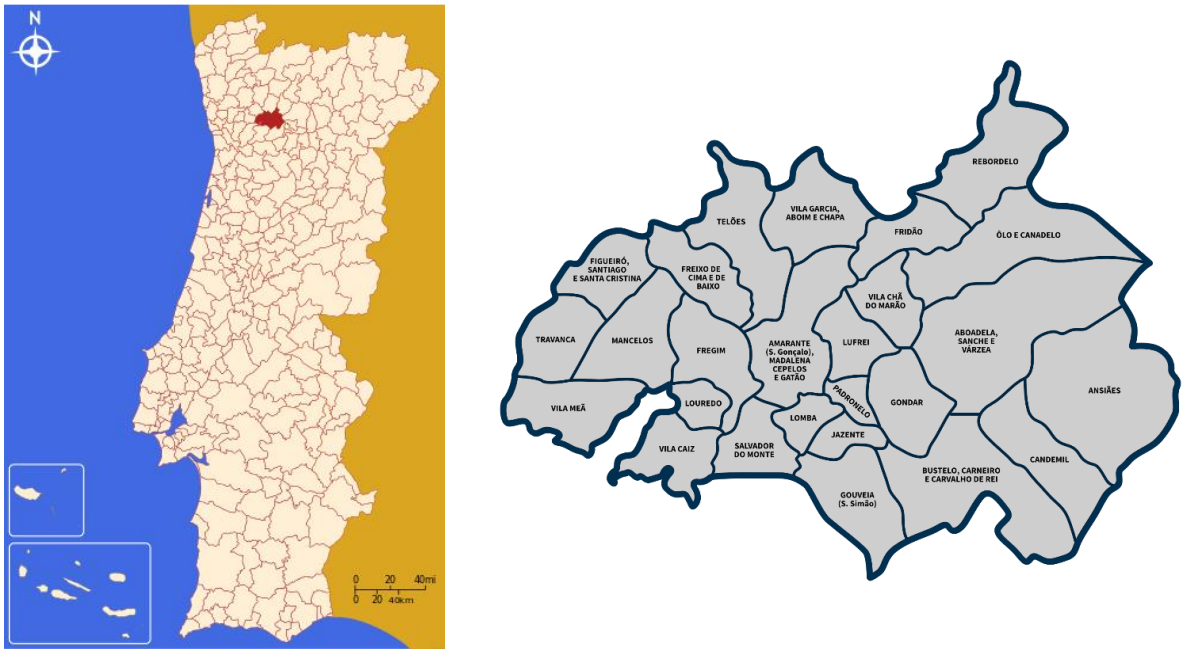

Figura 8 - Mapa de Portugal Continental mostrando a localização do município de Amarante (à esquerda); mapa do concelho de Amarante e as diferentes freguesias em que se encontra dividido (extraídos de https://pt.wikipedia.org/wiki/Amarante_(Portugal) e https://www.cm-amarante.pt/, respetivamente).

O município de Amarante é limitado a norte pelo município de Celorico de Basto, a NE por Mondim de Basto, a E por Vila Real e por Santa Marta de Penaguião, a S por Baião, Marco de Canaveses e Penafiel, a O por Lousada e a NO por Felgueiras.

3.2. Enquadramento Geomorfológico

Relativamente ao relevo, o concelho de Amarante apresenta duas zonas com características muito distintas. A figura 9 mostra que na região mais a oeste do município o relevo é mais regular, atingindo uma altura máxima de 500 m, enquanto na zona mais a este a irregularidade é muito superior, chegando a apresentar declives bastante acentuados. Tal facto é justificável por nesta zona se situar a Serra do Marão, que corresponde à maior altitude do concelho. A altitude do concelho varia assim entre os 60 m e os 1348 m (Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios de Amarante 2016-2020).

Na direção da Serra do Marão para Amarante surge um vale muito apertado e depois da freguesia de Ansiães surge um vale mais aberto e sinuoso, no fundo do qual está situado o rio Marão que em

Várzea se junta ao rio Ovelha, afluente do Tâmega. O rio Tâmega corre em vale bastante aberto a SW de Amarante e encontra-se orientado segundo NE-SW na região de Amarante.

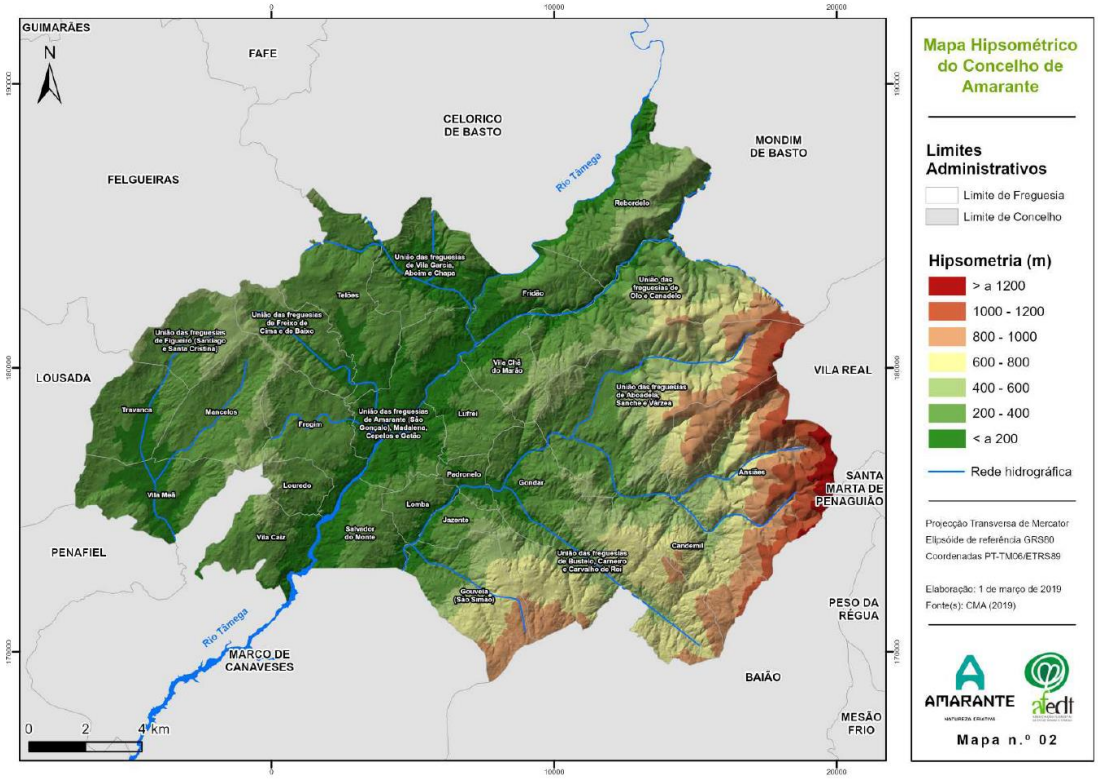

Figura 9 - Mapa Hipsométrico do Concelho de Amarante (extraído de https://www.cm-amarante.pt/).

3.3. Enquadramento Geológico

A região de Amarante é geologicamente constituída na sua maioria por granitos tardi-hercínicos, com aproximadamente 311±2 M.a, num extenso maciço tardi-orogénico (Figura 10).

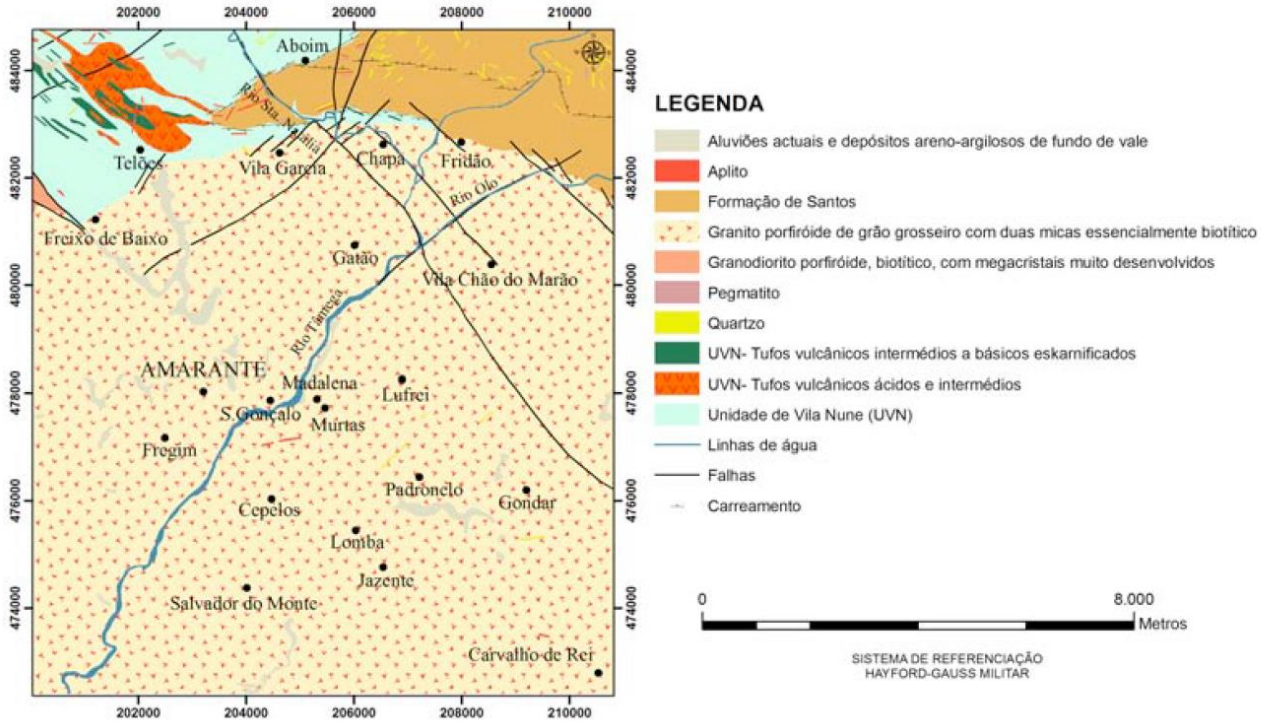

Figura 10 - Mapa geológico simplificado da região de Amarante (modificado a partir das Cartas Geológicas 10-A-Celorico de Basto e 10-C- Peso da Régua, Martins et al., 2010).

No setor norte do concelho, mais precisamente em Aboim, ocorrem rochas meta sedimentares do Paleozóico, A Formação de Santos corresponde a terrenos autóctones do Devónico Inferior constituída por uma alternância de filitos, xistos cinzentos e metassiltitos com passagem superior a filitos, metagrés e metagrauvaques; A Unidade de Vila Nune que corresponde a terrenos alóctones do Silúrico Inferior que reúnem tufos vulcânicos correspondentes a metagrés (Pereira, 1989).

Na área deste concelho podemos distinguir dois tipos de granitos dominantes: o granito porfiroide biotítico de grão grosseiro, que aflora próximo da freguesia de Telões; e o granito porfiroide biotítico de grão médio que aflora na zona de Padronelo.

A análise do granito biotítico da região de Amarante, realizada através da observação dos minerais acessórios e dos respetivos espectros na microssonda eletrónica (ME), identificou os seguintes minerais: alanite (Figura 11a), apatite (Figura 11b), zircão (Figura 11c), monazite (Figura 11b), uraninite (Figura 11d), torianite (Figuras 11b, 11e) e torite (Figuras 11c, 11f).

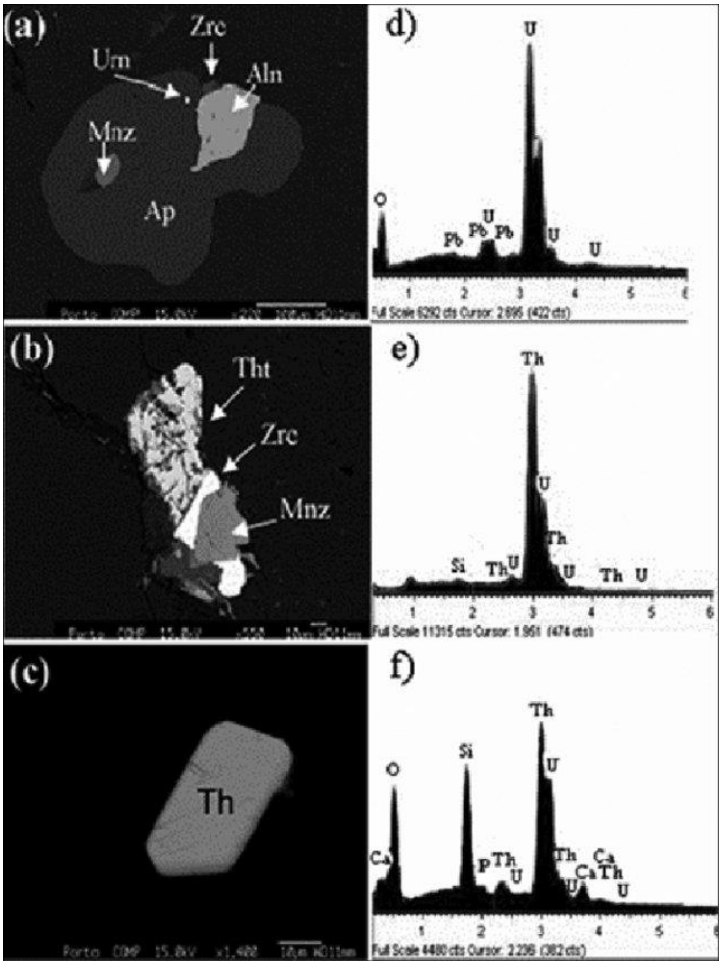

Figura 11 - Imagens de eletrões retrodifundidos dos minerais acessórios obtidos pela ME: a) alanite (Aln), zircão (Zrc), apatite (Ap), monazite (Mnz), uraninite (Urn); b) torianite (Tht), zircão (Zrc) e monazite (Mnz); c) torite (Th); d) espectro da uraninite; e) espectro da torianite; f) espectro da torite (Martins et al., 2013a).

Os principais lineamentos estruturais da zona granítica do concelho definem duas direções preferenciais, N50°E, resultante das linhas de fratura que promoveram o encaixe do Rio Tâmega, e N50°W, marcado pela falha de Fornelo-Padronelo. A maior frequência do comprimento das falhas nesta zona verifica-se segundo as direções N80°E, N40°W, N20°E e N10°W. Os lineamentos estruturais N50°E e N50°W também se encontram presentes nos metassedimentos, sendo que estes são também afetados por vários sistemas de falhas tardi-hercínicas com orientações preferenciais NE-SW, NW-SE e também N-S. O sistema de lineamentos estruturais mais marcado é o NW-SE. A maior frequência de comprimento dos lineamentos existentes na zona de Aboim corresponde às direções N50°E, N50°W e N10°E. Os metassedimentos apresentam ainda frequentes carreamentos com atitude N80°E; 80°N.

3.4. Enquadramento Climático

Conforme convencionado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o clima pode ser definido como uma "síntese das condições meteorológicas", ou mais precisamente, como a descrição estatística das características do estado do tempo durante um período de tempo de 30 anos. Os elementos climáticos são geralmente variáveis observadas à superfície da Terra como é o caso da temperatura e da precipitação (IPCC, 2009).

Para a delimitação dos distintos tipos de clima da Península Ibérica foi utilizada a classificação climática de Köppen que define os distintos tipos de clima a partir dos valores médios mensais de precipitação e da temperatura. Para a delimitação dos distintos climas estabelecem-se intervalos de temperatura e precipitação baseados principalmente na sua influência sobre a distribuição da vegetação e da atividade humana (Essenwanger, 2001).

Os resultados das normais climatológicas 1971-2000, as últimas disponíveis, permitem identificar os diferentes tipos de clima existentes em Portugal Continental (Figura 12).

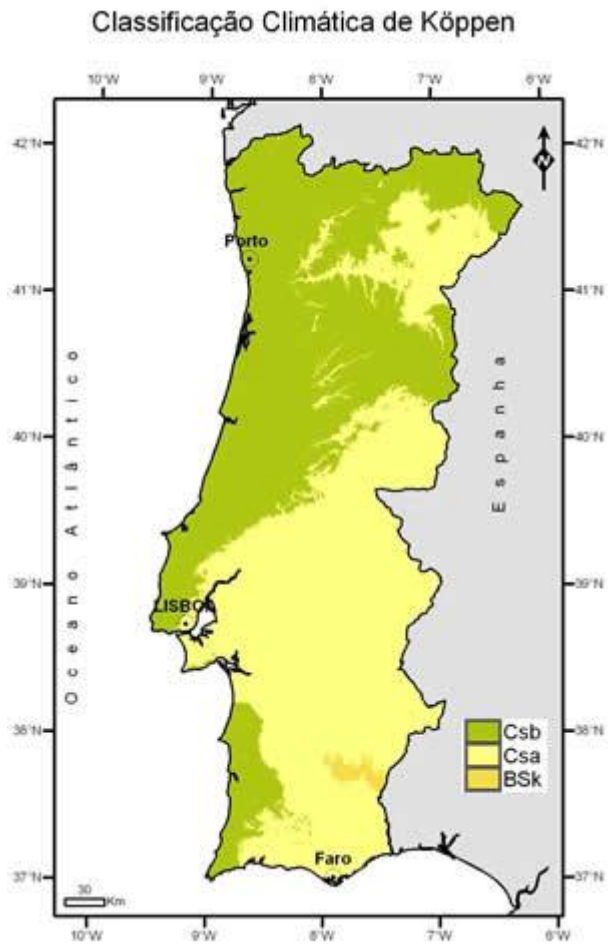

Figura 12 - Diferentes tipos de clima existentes em Portugal Continental segundo a classificação climática de Köppen (extraído de https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/).

Os resultados obtidos pela cartografia, para esta classificação climática, permitem confirmar que na maior parte do território Continental o clima é Temperado, de Tipo C, isto significa que a temperatura média do mês mais frio está compreendida entre 0 e 18 ˚C.

Verifica-se ainda o Subtipo Cs (clima temperado com Verão seco) e as variedades Csa (clima temperado com Verão seco e quente), onde a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 ˚C, e Csb (clima temperado com Verão seco e temperado), onde a temperatura média do mês mais quente é menor ou igual a 22 ˚C e com quatro meses ou mais com temperatura média superior a 10 ˚C (Atlas Climático Ibérico, 2011).

De acordo com o mapa apresentado na Figura 12, podemos concluir que o município de Amarante se encontra situado numa região onde se encontram as duas variedades Csa e Csb.

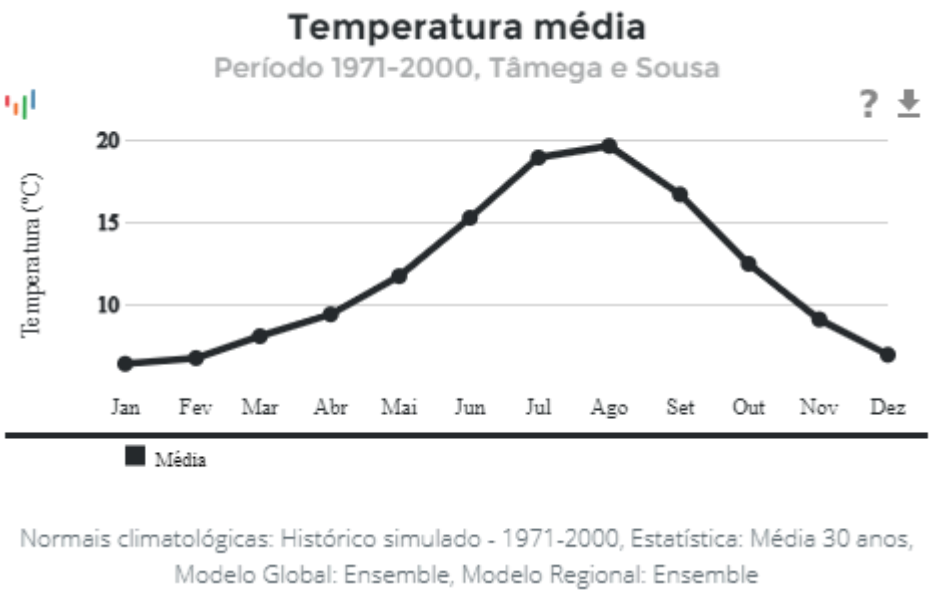

Figura 13 - Gráfico da temperatura média da normal climática de 1971-2000 da região do Tâmega e Sousa (extraído de http://portaldoclima.pt/pt/).

Da análise da Figura 13, que representa a variação da temperatura média mensal para o período de 1971 a 2000 da região do Tâmega e Sousa, na qual está inserido o conselho de Amarante, podemos verificar que efetivamente existem mais de quatro meses onde a temperatura média é superior a 10 ˚C, sendo estes maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro. No entanto a temperatura média do mês mais quente do ano, agosto, não chega a alcançar os 20 ˚C, ficando assim abaixo do valor delimitado por 22 ˚C no caso da variedade Csa.

3.5. Recursos Hídricos

O concelho de Amarante encontra-se inserido na bacia hidrográfica do Rio Douro. O rio Tâmega é o afluente mais importante do concelho, a sua nascente fica situada em Espanha na Serra de San Mamede na província de Ourense e desagua no rio Douro em Entre-os-Rios.

Os restantes cursos de água principais do concelho são: a Ribeira de Santa Natália, a Ribeira de S. Lázaro e o Rio Odres que são afluentes da margem direita do Rio Tâmega, e os Rios Ôlo e Ovelha que são afluentes da sua margem esquerda. Os Rios Marão e Fornelo são subafluentes do Rio Tâmega e afluentes da margem esquerda do Rio Ovelha. Para além destes principais cursos de água, o município é servido por uma extensa rede de cursos de água semipermanentes e temporários.

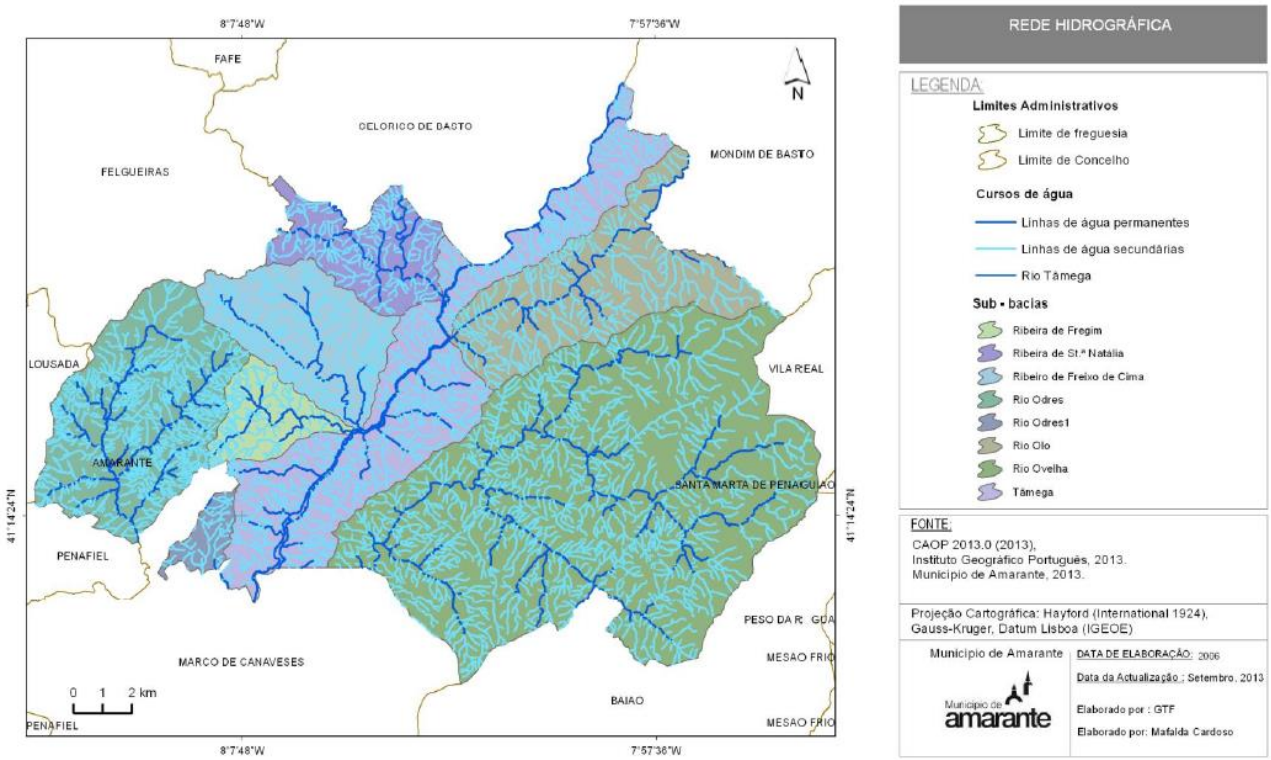

Figura 14 - Bacias hidrográficas do concelho de Amarante (extraído de Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios de Amarante 2016-2020).

Quanto à unidade hidrogeológica, a região de Amarante está localizada no Maciço Antigo, estando o seu sistema aquífero inserido no grupo do Maciço Antigo Indiferenciado.

CAPÍTULO 4: RADIATIVIDADE NA REGIÃO DE AMARANTE

4.1. Enquadramento radiométrico a nível europeu e nacional

O Atlas Europeu da Radioatividade publicado em 2019 pelo Joint Research Center (JRC) apresenta valores de referência para as fontes naturais de radiação espalhadas pela União Europeia e estabelece bases de dados harmonizadas disponíveis para a comunidade científica e para as autoridades (JRC, 2019). Este Atlas é um resultado da colaboração entre o JRC e mais de 60 instituições, incluindo universidades, centros de investigação, autoridades nacionais e europeias, bem como organizações internacionais. Esta enciclopédia da radioatividade natural descreve as diferentes fontes de radioatividade natural em partes diferentes da Europa.

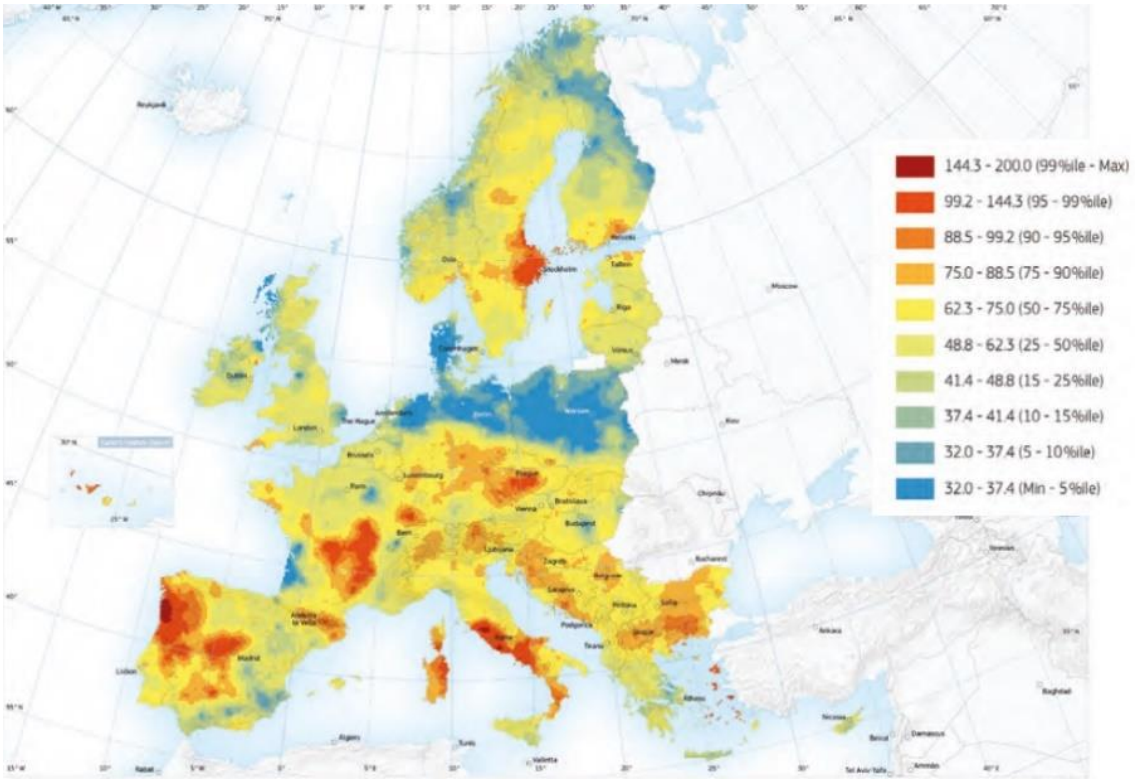

Figura 15 - Mapa Europeu de taxa de radiação Gama terrestre (extraído de Atlas Europeu da Radiação Natural - disponível em https://healthnews.pt/2020/07/20/atlas-europeu-da-radiacao-natural-novos-mapas-mostram-niveis-de-radiacao-onde-vive/)

O mapa apresentado na Figura 15 mostra a taxa de radiação gama, em žGy h^{-1}, que uma pessoa receberia da radiação terrestre, se ela/ele passasse todo o tempo de referência num local ao ar livre em que o solo tenha fixado concentrações U, Th e K.

A Figura 16 apresenta os resultados da concentração média de radão em 21 países europeus, baseados em 800.000 análises em quartos de habitações, o que corresponde a 1800 unidades espaciais de 10 km×10 km. É possível constatar que alguns países como por exemplo a Inglaterra apresentam um levantamento muito completo o mesmo não sucedendo noutros como por exemplo a Espanha.

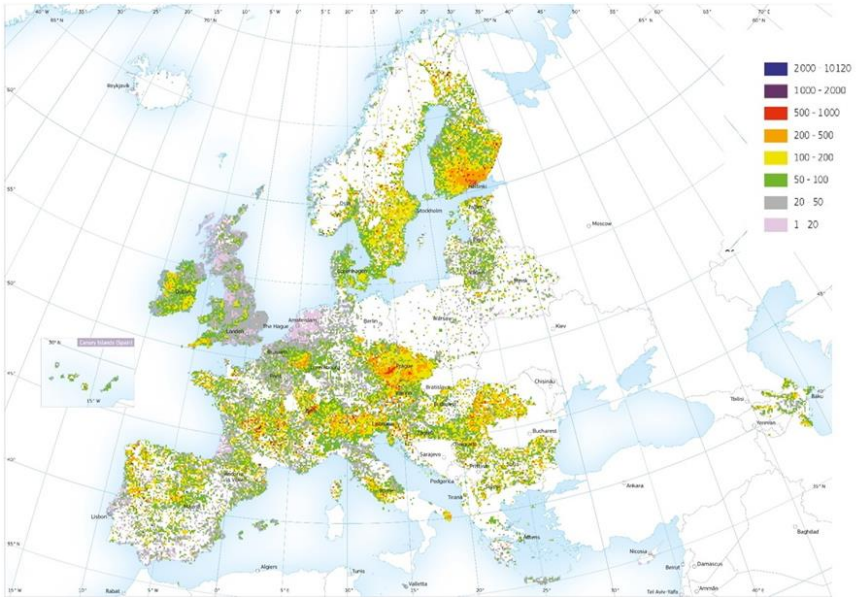

Figura 16 - Concentração média de radão em 21 países europeus (extraído de Atlas Europeu da Radiação Natural - disponível em https://healthnews.pt/2020/07/20/atlas-europeu-da-radiacao-natural-novos-mapas-mostram-niveis-de-radiacao-onde-vive/).

A figura 17 apresenta a carta de radiação gama natural de Portugal Continental proposta por Saraiva et al. (1998).

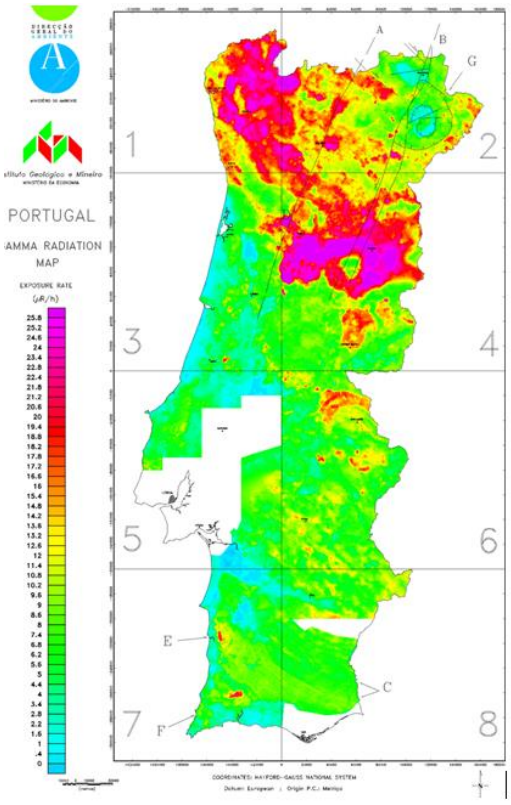

Figura 17 - Carta de radiação gama natural de Portugal Continental. A: falha de Régua-Verin; B: falha de Vilariça; C: as unidades do flysch das formações de Mira e Mértola são claramente visíveis na imagem radiométrica; D: São Pedro do Sul; E: vulcânicas cartografadas com um mesmo comportamento geológico; F: complexo sienítico de Monchique, mostra características geoquímicas diferentes, a E e W uma falha importante; G-complexo básico e ultrabásico de Morais-Vinhais (imagem extraída de Saraiva et al., 1998).

A presença de rochas graníticas na zona Centro e Norte de Portugal constitui a fonte de radão nas zonas identificadas em Portugal como de risco elevado. Os distritos mais críticos são Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu, Castelo Branco e Portalegre.

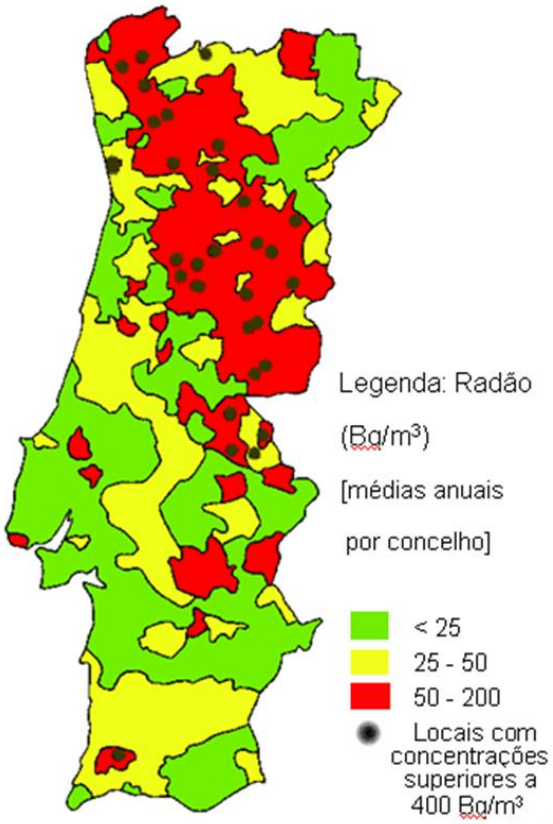

Figura 18 - Radioatividade no interior de habitações devida ao radão – estudo realizado pelo ITN (extraído de https://1.bp.blogspot.com/-zJOU96vMedg/VfAJCfeYD3I/AAAAAAAAO-c/vXyatLYCjJ8/s1600/rada%CC%83o-portugal.png).

Um estudo realizado pela DECO em 2001 em 212 casas localizadas nos Distritos de Aveiro, Guarda e Braga, conclui embora a maioria das habitações (cerca de 2/3 das medições realizadas) apresentassem valores abaixo de 200 (Bq m^{-3}), 22% dos casos excederam o limite 200 (Bq m^{-3}) e 17% estavam mesmo acima de 400 (Bq m^{-3}). Estes dados não permitiram, contudo, opinar sobre a sua origem, ou seja, se os valores estão associados aos materiais de construção ou se tem proveniência do solo. Em Setembro de 2005, o Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN), realizou um estudo em 4200 habitações, concluindo que 60% das concentrações de radão estavam abaixo de 50 (Bq m^{-3}) e somente 2,6% das habitações apresentavam concentrações acima de 400 (Bq m^{-3}) (Figura 18).

4.2. Enquadramento radiométrico na região de Amarante

A região de Amarante (GAM) é composta por um extenso maciço tardi- a pós-tectónico representado pelo granito de Amarante (Figura 19), de grão médio a grosseiro, porfiróide e essencialmente biotítico. O granito intruiu rochas metassedimentares dos complexos parautóctone

(Unidade de Mouquim-Canadelo) e alóctone inferior (unidade de Vila Nune) de idade silúrica a devónica (Pereira, 2006).

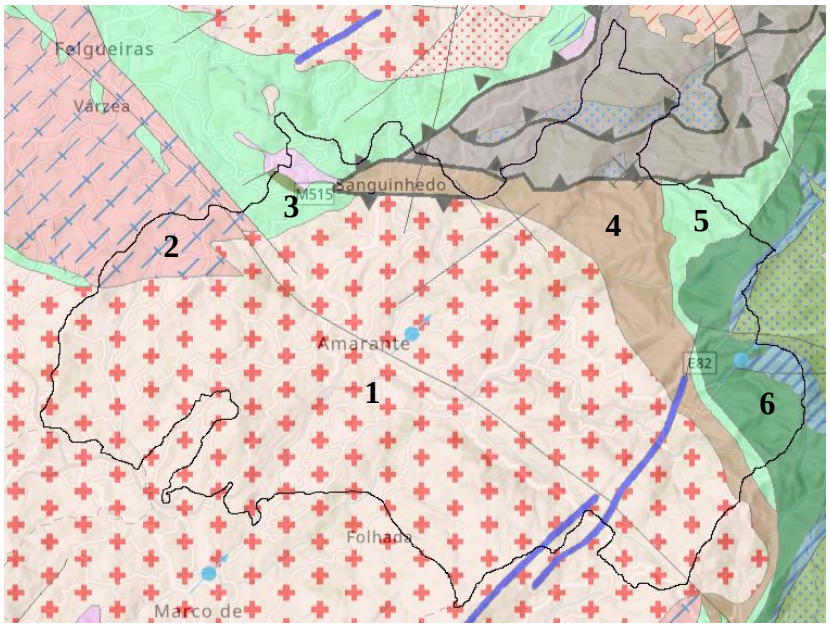

Figura 19 - Carta Geológica de Portugal, escala 1:50000 (Folha 10A – Celorico de Basto), com o município de Amarante delimitado (fonte: www.geoportal.lneg.pt): (1) granito porfiróide de grão grosseiro; com duas micas (Granito de Amarante); (2) Granodioritos porfiroides biotíticos com megacristais muito desenvolvidos segundo (001); (3) Unidade de Vila Nune com tufos vulcânicos ácidos a intermédios; (4) Alternância de filitos e xistos com metassiltitos e metagrauvaques; (5) Formação de Campanhô; (6) Xistos filito-grafitosos e xistos ardosíferos (Formação de Pardelhas - Ordovícico)

Tabela 7. Parâmetros radiométricos registados nas diferentes litologias de Amarante (Martins et al., 2013a).

	Litologias	Amostras	K	U	Th	Total	Dose
Unidades		N	(%)	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	(cps)	(žGy h^{-1})
Amarante	GAM	13	2.7-4.5	7-17	22-42	410-630	205-310
	MTS	2	1.7-2-1	5-6	15-23	295-320	152-157

GAM: Granito de Amarante; MTS: Metassedimentos

Como podemos observar na tabela 7, os teores médios de U (7 a 17 mg kg^{-1}) e Th (22 a 42 mg kg^{-1}) são superiores à média crustal continental superior, estimados em 2,8 mg kg^{-1} para o U e 10,7 mg kg^{-1} para o Th, estes valores são justificados pelo facto do granito que aflora em Amarante possuir minerais acessórios como o zircão, monazite, uraninite, alanite, torianite e torite, portadores de U e Th. Os valores medidos nos metassedimentos também se encontram acima dos da média crustal continental superior tanto para o U (5 a 6 mg kg^{-1}) como para o Th (15 a 23 mg kg^{-1}) e todos são superiores aos da crusta continental superior. Analisando a figura 4.5, podemos verificar que se trata de uma zona geologicamente composta por xistos cinzentos silico-carbonosos da Formação de Campanhó e Ferradosa do Silúrico; e xistos ardosíferos, xistos carbonosos com intercalações de metassiltitos na base da Formação de Pardelhas do Ordovícico.

Toda a região de Amarante cuja geologia é composta por granito biotítico porfiróide de grão grosseiro apresenta risco médio para todos os radionuclídeos analisados. Para os radionuclídeos

^{210}Po, ^{226}Ra, ^{234}U e ^{238}U distingue-se uma zona onde o risco por unidade geológica é elevado na região noroeste e oeste do concelho que corresponde a uma área cuja geologia é composta por uma sequência negativa de turbiditos com intercalação de tufitos no topo que corresponde à Formação de Santos e Curros do Silúrico-Devónico. Os isótopos mais importantes do ponto de vista da produção de radiação gama são o ^{40}K, ^{238}U e ^{232}Th. A distribuição destes isótopos determina, por conseguinte, a dose de radiação externa produzida por rochas e solos.

A Figura 20 apresenta o mapa de distribuição regional de fluxo de radiação gama onde se insere a região de Amarante, onde é possível observar que o município se encontra localizado numa região cuja taxa de exposição é bastante elevada.

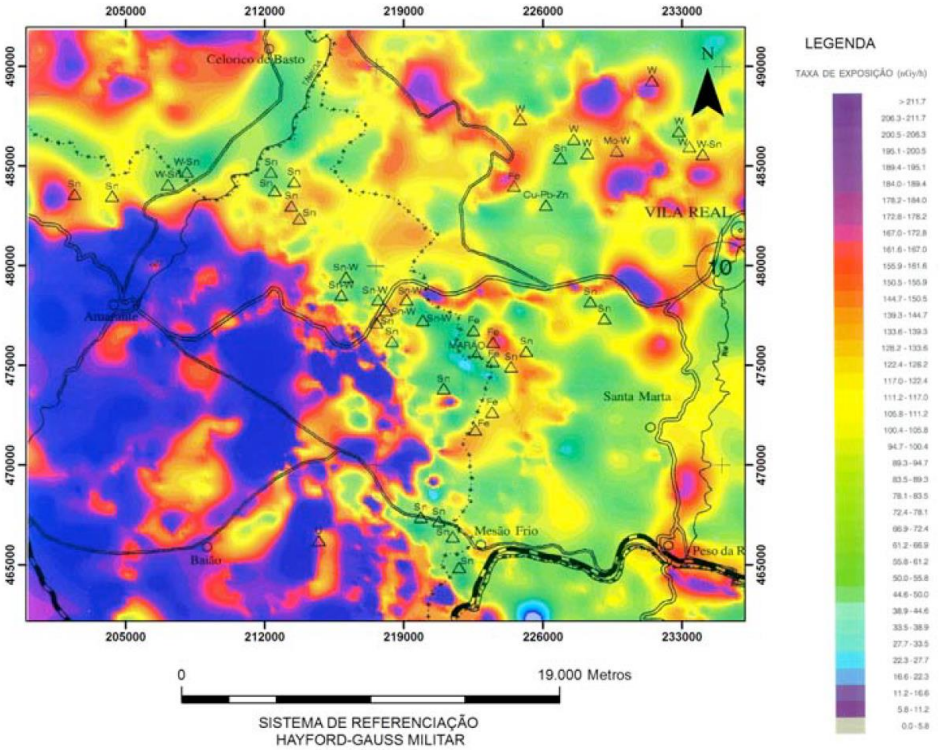

Figura 20 - Mapa de exposição à radiação gama na região de Amarante (adaptado de Leote e Silva, 1993).

Estudos realizados revelam que os fluxos de radiação gama nas rochas e solos apresentam alguma variabilidade nas litologias dominantes da região (Figura 21).

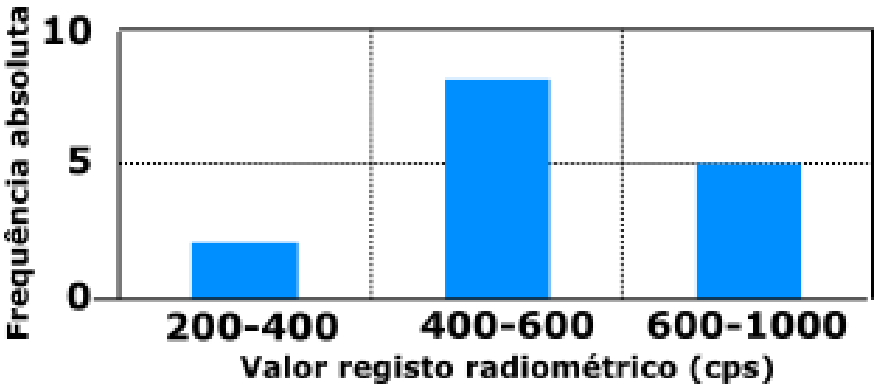

Figura 21 - Histograma dos fluxos de radiação gama nas rochas da região de Amarante (fonte: Martins et al., 2010).

Como podemos observar na Figura 21, é possível distinguir três classes distintas: uma primeira classe, com o registo radiométrico mais baixo (200 a 400 cps), correspondente aos metassedimentos; uma segunda classe, onde foram medidos valores intermédios de radiação gama (400 a 600 cps) correspondente ao granito de Amarante; e uma terceira classe cujos valores são mais elevados (600 a 1000 cps) correspondente ao mesmo granito, mas com pequenas anomalias associadas a fraturas com andamentos dominantes N50°E e N60°W. Embora as anomalias não sejam muito pronunciadas, é de realçar a elevada frequência com que ocorrem.

De referir que foram também detetados alguns valores da dose de radiação externa acima do *background* das rochas granitóides da ZCI (200 žGy/h); nomeadamente 205 a 310 žGy/h para o granito de Amarante. Também se observou que os metassedimentos de Vila Real apresentam valores da dose de radiação externa que variam entre 113 e 170 žGy/h).

CAPÍTULO 5: METODOLOGIA

A metodologia adotada para a avaliação dos níveis de radiatividade natural em águas de consumo consistiu na recolha, tratamento e análise de dados disponibilizados pela ERSAR-Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, e ainda na recolha de informação pré-existente, como é o caso do estudo realizado por Martins et al. em 2013, cujos resultados são apresentados mais à frente neste subcapítulo.

A ERSAR, enquanto autoridade competente para a qualidade da água destinada ao consumo humano, é responsável pela coordenação e fiscalização da aplicação do Decreto-Lei nº306/2007, de 27 de agosto, alterado pelo Decreto-Lei nº152/2017, de 7 de dezembro que preconiza a elaboração de um relatório técnico anual, a disponibilizar ao público, referente à conformidade legal da verificação da qualidade da água a partir dos dados submetidos pelas entidades gestoras.

No cumprimento das suas atribuições, e de acordo com os diplomas referidos, o modelo de regulação da ERSAR é dirigido a todas as entidades gestoras de sistemas públicos de abastecimento de água para consumo humano, destacando-se o fato da verificação de conformidade da qualidade da água ser obrigatoriamente realizada na torneira do consumidor ou no ponto de entrega, consoante se trate, respetivamente, de entidades gestoras em baixa ou em alta. Assim, é anualmente elaborado um relatório sobre o controlo da qualidade da água para consumo humano. Este relatório sintetiza a informação mais relevante relativa à qualidade da água, recaindo a análise sobre os resultados do controlo da qualidade da água realizado pelo conjunto das entidades gestoras de sistemas de abastecimento público da água de Portugal Continental. Para além do relatório anual, a ERSAR disponibiliza ainda os dados recolhidos que servem para a elaboração do mesmo. Esses dados foram recolhidos, tratados e analisados para a elaboração da presente dissertação.

Uma vez que apenas as análises disponibilizadas pela ERSAR, relativas aos anos de 2019 e 2020, é que possuíam valores de concentrações de radão e α-total, procedeu-se ainda à consulta do Relatório de Monitorização da Radioatividade em Água para Consumo Humano em Portugal Continental: Avaliação do Risco (Pereira e Domingos, 2019; 2020). Os relatórios mencionados anteriormente foram redigidos após análise da informação analítica reportada à ERSAR pelas entidades gestoras dos sistemas de abastecimento público, composta por dados sobre os parâmetros: radão (^{222}Rn), alfa total e beta total, urânio (^{238}U e ^{234}U), rádio (^{226}Ra), polónio (^{210}Po) e dose indicativa (DI), referente a análises obtidas na monitorização efetuada pelas entidades gestoras entre 2016 e 2019 em amostras de água destinadas ao consumo humano. E ainda após a análise de dados sobre os parâmetros césio (^{137}Cs), estrôncio (^{90}Sr) e trítio (^{3}H) referentes a análises obtidas na monitorização efetuada entre 2002 e 2019.

Após a recolha de todos os dados, os autores elaboraram uma avaliação de risco associado à água subterrânea uma vez que os fatores geológicos são fatores a ter em conta na avaliação do risco do consumo da água uma vez que estes influenciam os resultados devido a processos de infiltração, percolação e acumulação da água subterrânea.

Foi assim realizada uma classificação do nível de risco por unidade geológica baseada num modelo constituído através da seguinte informação:

- distribuição da concentração de atividade dos parâmetros radiológicos em apreço (^{222}Rn, ^{210}Po, ^{226}Ra, ^{234}U, ^{238}U) em cada unidade geológica, dados disponibilizados pela ERSAR para amostras colhidas a partir de uma única captação do tipo subterrânea;
- dados sobre a taxa de dose de exposição a radiação gama de origem terrestre (TGDR) extraídos da Carta Radiométrica de Portugal (Batista, 2013);
- dados sobre a atividade de ^{226}Ra (Bq kg^{-1}) determinados em amostra de rocha constantes da base de dados interna do LRN e representativas das diversas unidades geológicas aflorantes no território nacional;
- dados de concentração de urânio (mg/kg) determinada em amostras de rocha provenientes de uma revisão bibliográfica feita pelo Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra em parceria com o grupo de monitorização de radioatividade ambiental (REM) do *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia no âmbito da elaboração do Atlas Europeu de Radiação Natural (AERN).

A avaliação do risco deve ter em consideração todos os resultados obtidos em pontos de amostragem representativos das zonas de abastecimento durante um período mínimo de 3 anos. No entanto, apenas foi considerado o valor máximo obtido em cada captação para a estimativa do nível de risco. A associação da unidade geológica à captação foi determinada pela interseção das coordenadas geográficas do local de implantação da mesma com os dados cartográficos expostos na Carta Geológica de Portugal à escala 1:1000000 recorrendo ao software ArcMap®. Assim, a avaliação do risco atribuída a cada unidade geológica está condicionada à disponibilidade de informação sobre a localização geográfica das captações (Pereira e Domingos, 2019; 2020).

Foram definidas 3 classes de risco, estando os seus valores limites estabelecidos na Tabela 9. Nessa tabela encontram-se explicados os critérios usados na definição das diferentes classes de risco para as diferentes bases de dados analisadas assim como se apresenta uma descrição estatística sumária da informação contida nas bases de dados da carta radiométrica de Portugal, do LRN e do AERN.

Tabela 8. Critérios para a determinação do nível de risco por unidade geológica.

Base de Dados	Baixo	Médio	Elevado
Base de dados da ERSAR (resultados de amostras recolhidas a partir de uma única captação do tipo subterrânea)	O valor da mediana estimado para o radionuclídeo (^{222}Rn, ^{210}Po, ^{226}Ra, ^{234}U ou ^{238}U) por unidade geológica é inferior a 30% do valor de referência estabelecido na legislação estabelecido no Quadro 1 do DL 152/2017	O valor da mediana estimado para o radionuclídeo (^{222}Rn, ^{210}Po, ^{226}Ra, ^{234}U ou ^{238}U) por unidade geológica é igual ou superior a 30% e inferior a 60% do valor de referência estabelecido na legislação estabelecido no Quadro 1 do DL 152/2017	O valor da mediana estimado para o radionuclídeo (^{222}Rn, ^{210}Po, ^{226}Ra, ^{234}U ou ^{238}U) por unidade geológica é igual ou superior a 60% do valor de referência estabelecido na legislação estabelecido no Quadro 1 do DL 152/2017
Carta radiométrica de Portugal (TGDR)	O valor da mediana por unidade geológica é inferior a 30% do valor do 3º quartil de TGDR medido em Portugal Continental	O valor da mediana por unidade geológica é igual ou superior a 30% e inferior a 60% do valor do 3º quartil de TGDR medido em Portugal Continental	O valor da mediana por unidade geológica é igual ou superior a 60% do valor do 3º quartil de TGDR medido em Portugal Continental
Base de dados do LRN (atividade de ^{226}Ra determinada em amostras de rocha)	O valor da mediana por unidade geológica é inferior a 30% do valor do 3º quartil de atividade de ^{226}Ra medida em Portugal Continental	O valor da mediana por unidade geológica é igual ou superior a 30% e inferior a 60% do valor do 3º quartil de atividade de ^{226}Ra medida em Portugal Continental	O valor da mediana por unidade geológica é igual ou superior a 60% do valor do 3º quartil de atividade de ^{226}Ra medida em Portugal Continental
Base de dados do AERN (concentração de U, em mg/kg, determinada em amostras de rocha)	O valor da mediana por unidade geológica é inferior a 30% do valor do 3º quartil da concentração de U medida em Portugal Continental	O valor da mediana por unidade geológica é igual ou superior a 30% e inferior a 60% do valor do 3º quartil da concentração de U medida em Portugal Continental	O valor da mediana por unidade geológica é igual ou superior a 60% do valor do 3º quartil da concentração de U medida em Portugal Continental

Para as diversas variáveis que integram o modelo de avaliação do risco foi atribuído um peso específico que procura ter em conta a influência que cada uma possa ter no resultado. Atendendo a que a distribuição dos radionuclídeos na água será, naturalmente, a condicionante mais importante na estimativa do risco atribui-se-lhe um peso de 70 %. Para as restantes variáveis, que no conjunto contribuem com um peso total de 30 %, assumiu-se não haver razões para considerar diferenças significativas na contribuição de cada uma para a avaliação do risco, pelo que foi atribuído um peso de 10 % a cada variável. Contudo, dado não existir informação disponível para as diversas variáveis em todas as unidades geológicas, assumiram-se, nessas situações e para os diferentes cenários possíveis, os critérios de ponderação do risco definidos na tabela 9.

Tabela 9. Critérios de ponderação utilizados para o cálculo dos níveis de risco.

Dados	**ERSAR**	**TGDR**	**LRN**	**AERN**
Todas as bases de dados	70 %	10 %	10 %	10 %
Bases de dados da ERSAR + 2 bases de dados	$\frac{11}{15}\times 100$	$\frac{2}{15}\times 100+\frac{2}{15}\times 100$		
Bases de dados da ERSAR + 1 base de dados	80 %	20%		
Todas as bases de dados exceto ERSAR	-	$\frac{1}{3}\times 100$	$\frac{1}{3}\times 100$	$\frac{1}{3}\times 100$
Pelo menos 2 bases de dados exceto ERSAR	-	50 % + 50 %		
Apenas uma base de dados	100%			

De acordo com estes critérios foram elaborados os mapas de risco para cada um dos parâmetros radiológicos (Figuras 22 e 23), com os limites geográficos dos municípios de Portugal Continental adaptados da Carta Administrativa Oficial de Portugal (Pereira e Domingos, 2020).

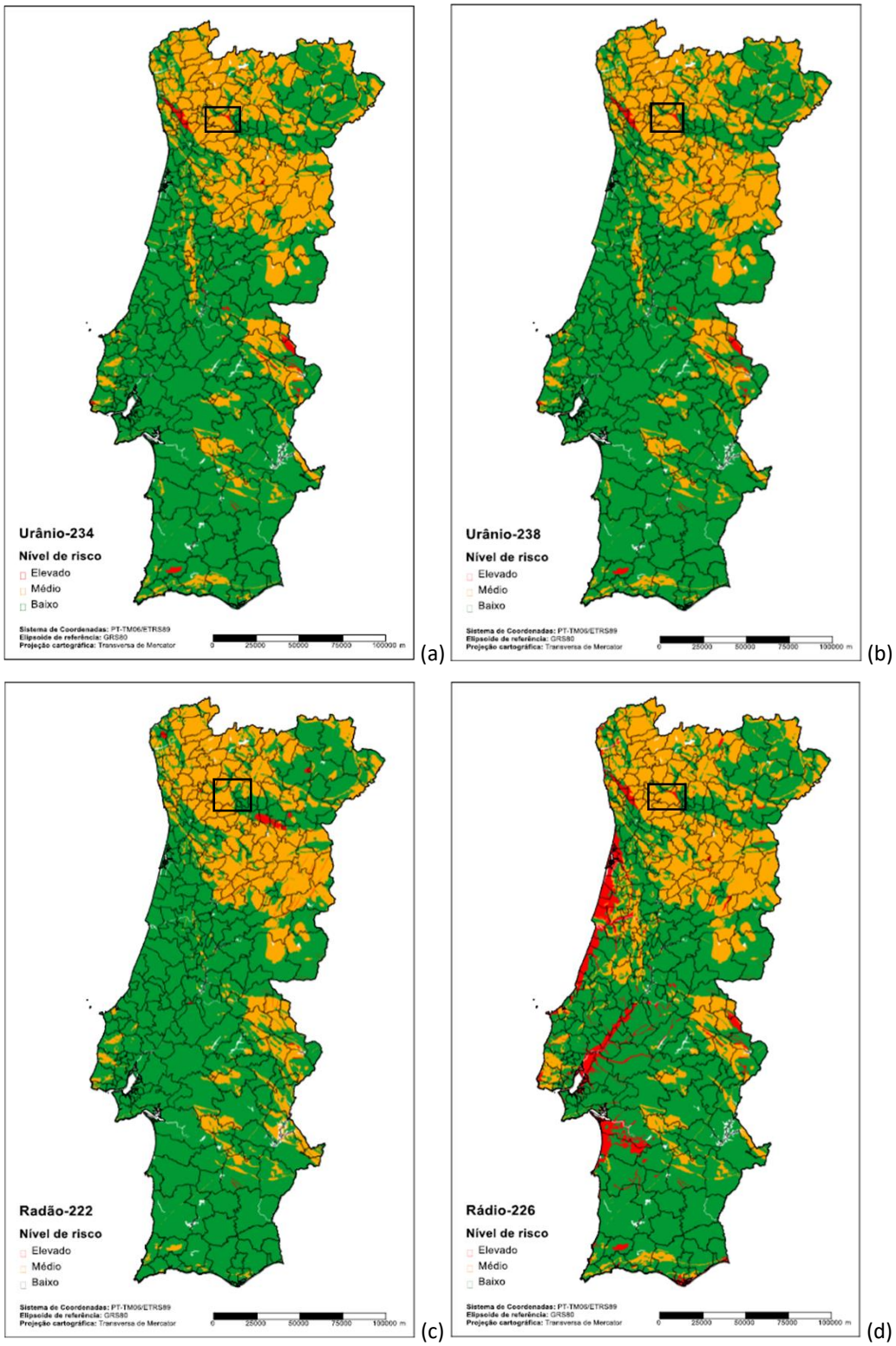

Figura 22 - Mapa do nível de risco por unidade geológica da concentração de atividade de ^{234}U (a), ^{238}U (b), ^{222}Rn (c), ^{226}Ra (d) e com o concelho de Amarante assinalado.

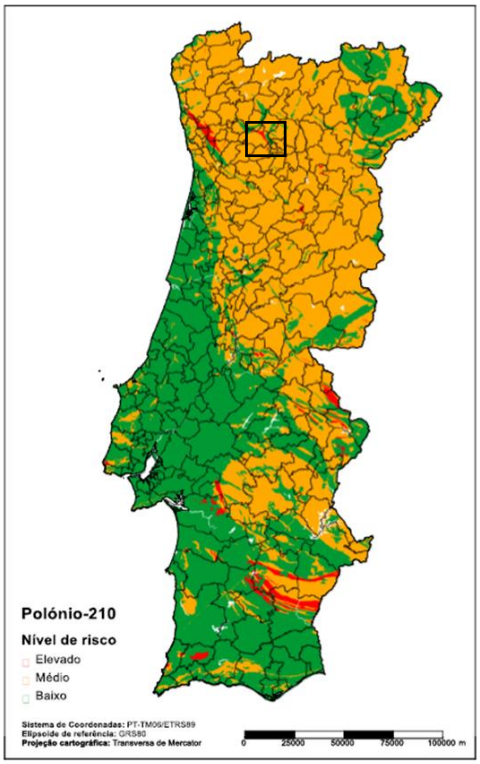

Figura 23 - Mapa do nível de risco por unidade geológica da concentração de atividade de ^{210}Po com o concelho de Amarante assinalado.

Apesar do risco por unidade geológica no concelho de Amante variar entre o baixo e o elevado consoante a zona e a atividade de cada radionuclídeo, o Relatório de Monitorização da Radioatividade em Água para Consumo Humano em Portugal Continental: Avaliação do Risco, apresenta ainda uma tabela onde identifica o nível de risco estimado por conselho e por parâmetro. De acordo com a tabela 10, a região de Amarante apresenta um risco elevado para todos os radionuclídeos.

Tabela 10. Nível de risco estimado por concelho e por parâmetro (tabela extraída do Relatório de Monitorização da Radioatividade em Água para Consumo Humano em Portugal Continental: Avaliação do Risco, elaborado pelo Laboratório de Radioatividade Natural (2020)).

Concelho	Radão-222	Polónio-210	Rádio-226	Urânio-234	Urânio-238
ABRANTES	Médio	Médio	Elevado	Médio	Médio
ÁGUEDA	Médio	Médio	Elevado	Médio	Médio
AGUIAR DA BEIRA	Médio	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
ALANDROAL	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
ALBERGARIA-A-VELHA	Médio	Médio	Elevado	Médio	Médio
ALBUFEIRA	Médio	Médio	Elevado	Médio	Médio
ALCÁCER DO SAL	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
ALCANENA	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo
ALCOBAÇA	Baixo	Médio	Elevado	Médio	Médio
ALCOCHETE	Baixo	Baixo	Elevado	Baixo	Baixo
ALCOUTIM	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo
ALENQUER	Médio	Médio	Elevado	Médio	Médio
ALFÂNDEGA DA FÉ	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
ALIJÓ	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
ALJEZUR	Médio	Elevado	Elevado	Médio	Médio
ALJUSTREL	Médio	Elevado	Elevado	Médio	Médio
ALMADA	Baixo	Baixo	Elevado	Baixo	Baixo
ALMEIDA	Elevado	Médio	Médio	Médio	Médio
ALMEIRIM	Baixo	Baixo	Elevado	Baixo	Baixo
ALMODÔVAR	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo
ALPIARÇA	Baixo	Baixo	Elevado	Baixo	Baixo
ALTER DO CHÃO	Médio	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
ALVAIÁZERE	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
ALVITO	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
AMADORA	Médio	Médio	Elevado	Médio	Médio
AMARANTE	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
AMARES	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
ANADIA	Baixo	Médio	Elevado	Médio	Médio
ANSIÃO	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio

A tabela 11 apresenta os dados referentes à análise de amostras de água da região de Amarante e que consta dos Relatórios publicados pela ERSAR em 2019 e em 2020. Como é possível observar, as análises realizadas em 2020, destacam três pontos com a água classificada como imprópria para consumo uma vez que os valores obtidos são superiores ao valor paramétrico, sendo estes: (a) o local Várzea 1 com 30,8 µg L^{-1} de chumbo quando o valor paramétrico é de 10 µg L^{-1}, (b) o Fontanário de Covelas onde o teor de radão é de 516 Bq L^{-1}sendo este um valor superior aos 500 Bq L^{-1} definidos por lei, e (c) Ôlo onde o valor de alfa-total é de 0,21 Bq L^{-1} e o valor paramétrico é de 0,1 Bq L^{-1}.

Tabela 11. Dados referentes à região de Amarante nas análises realizadas pela ERSAR em 2019 e 2020.

Campanha	**2019**			**2020**			
Parâmetros	**Chumbo**	**Radão**	**DI**	**Chumbo**	**Radão**	**DI**	**α-total**
Análises realizadas em	**µg L^{-1}**	**Bq L^{-1}**	**mSv**	**µg L^{-1}**	**Bq L^{-1}**	**mSv**	**Bq L^{-1}**
Ansiães	<2	<10	<0,1	<1	<10	<0,1	<0,01
Ansiães - Fervença	<2	40,1	<0,1	<1	182	<0,1	<0,04
Ansiães – Póvoa	<2	< 10	<0,1	<2	**410**	<0,1	<0,04
Canadelo	<2	24,4	<0,1	<2	<10	<0,1	<0,04
Candemil 1	<2	<10	<0,1				
Candemil 2	<2		<0,1	<1	<10	<0,1	<0,01
Candemil 3	<2	31,4	<0,1	<1	129	<0,1	<0,04
Candemil 4	<2	<10	<0,1	<1	23,9	<0,1	<0,04
Candemil 5	<2	59,9	<0,1	<2	324	<0,1	0,08
Candemil 6	<2	80,2	<0,1	<1	151	<0,1	<0,04
Carneiro	<2	<10	<0,1				
Fridão	<2	21,6	<0,1	<1	230	<0,1	<0,04
Ôlo	<2	<10	<0,1	<2	<10	0,028	**0,21**
Sanche	<2	<10	<0,1	2,8	123	<0,1	<0,04
Sistema Principal AdNorte	<2	<10	<0,1	<1		<0,1	<0,04
Fontanário Covelas				<1	**516**	<0,1	<0,04
Carregal				<1	<10	<0,1	<0,04
Covelo do Monte				<1	<10	<0,1	<0,04
Igreja				<1	<10	<0,1	<0,04
Penouços				<1	<10	<0,1	<0,04
Várzea 1				**30,8**	232	<0,1	<0,04
Zona de Abastecimento de Rebordelo - Cortes				5,2	<10	<0,1	<0,04
Zona de Abastecimento de Rebordelo - Couto				2	<10	<0,1	<0,04
Zona de Abastecimento de Rebordelo - Sobreiras				9,4	<10	<0,1	<0,04
Zona de Abastecimento de Rebordelo - Vieiros				3,2	52,1	<0,1	<0,04

No ano de 2020 foram ainda analisadas as concentrações de alguns radionuclídeos no local de Ôlo, tendo sido obtidos os seguintes resultados: U^{234} – <0,004 Bq L^{-1}; U^{238} – <0,001. Bq L^{-1}; Po^{210} – 0,028 Bq L^{-1}; Ra^{226} – <0,03 Bq L^{-1}. Tendo em consideração a tabela 6, podemos verificar que todas as concentrações dos radionuclídeos analisados se encontram abaixo dos valores de referência.

Nos locais onde se possui dados relativos aos dois anos consecutivos (2019 e 2020), verifica-se que o teor de radão sofreu um aumento muito significativo de um ano para o outro, chegando a haver locais onde os teores no ano de 2019 são inferiores a 10 Bq L^{-1} e no ano seguinte passam para algumas centenas como é o caso de Ansiães-Póvoa onde o valor de 2020 é de 410 Bq L^{-1} (valor assinalado a azul na Tabela 12) Podemos verificar ainda que o valor da dose indicativa se manteve em todos os locais abaixo do valor paramétrico estipulado, em ambos os anos. Os valores de concentração de Pb na sua maioria encontram-se abaixo do valor paramétrico que está definido como sendo 10 µg L^{-1}.

Martins et al., (2013) estudaram 15 amostras de água, sendo uma de água superficial (3AS) e as restantes de origem subterrânea. Nas amostras de água recolhidas, foram detetadas concentrações de radão acima do valor permitido em seis amostras de água subterrânea.

Neste estudo apresentam-se os resultados das análises ao fundo radiométrico das rochas e à concentração de radão nas águas subterrâneas e superficiais da região de Amarante.

Como podemos observar as zonas de granito (1,2,4,5,6 e 7 – ver figura 24) são as que apresentam maiores valores de dose absorvida, assim como nas concentrações de U e de Th, sendo que os valores mais elevados estão associados a uma zona de falha (4, 5, 6 e 7). De salientar que em todas as litologias graníticas verificam-se valores de dose absorvida superiores ao registo mais frequente em rochas granitoides da Zona Centro Ibérica que corresponde a 200 žGy/h. As rochas metassedimentares (3), como expectável possuem um fundo radiométrico inferior em relação às rochas graníticas da região.

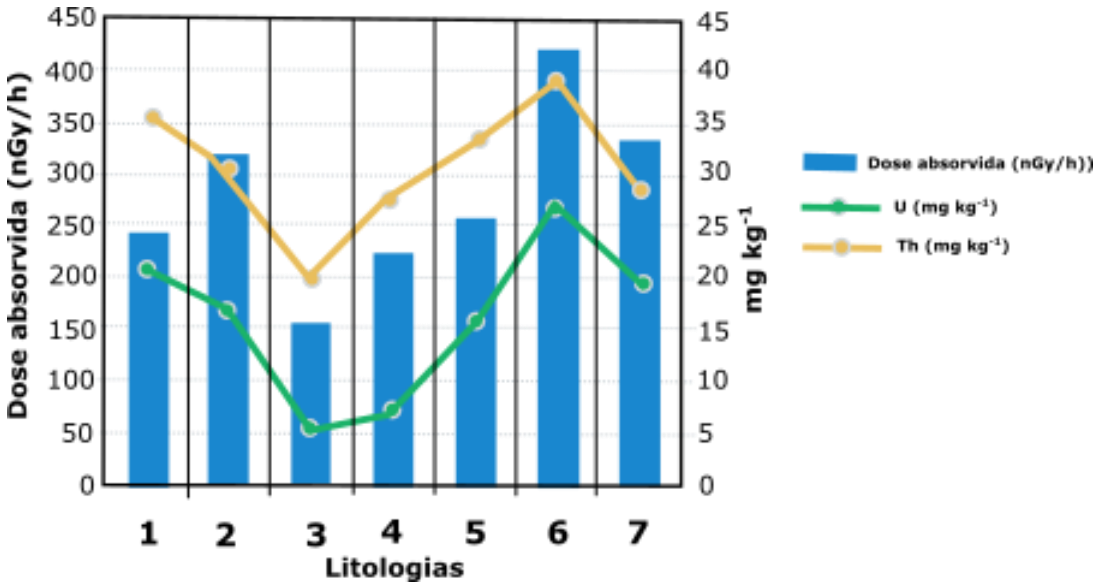

Figura 24 - Representação esquemática dos parâmetros radiométricos efetuados (adaptado de Martins et al., 2013b). Amostras: (1) Granito de Amarante-AT1; (2) Granito de Amarante – AT2: (3) Metassedimento; (4) Granito de Amarante – AT1- Falha N10°W; (5)) Granito de Amarante – AT1- Falha N30°-40°W; (6) Granito de Amarante – AT1- Falha N50°E; (7) Granito de Amarante – AT1- Falha N60°W

Assim, tendo em conta as análises realizadas e os dados pertinentes para a avaliação dos níveis de radioatividade natural em águas para consumo humano na região de Amarante, os valores que apresentam interesse são a concentração de chumbo, de radão, dose indicativa e alfa-total, que se encontram expostos na tabela 12. De referir ainda que os dados dizem respeito a análises realizadas em baixa.

Tabela 12. Parâmetros radiológicos (Rn, αTotal e βTotal) em águas subterrâneas das regiões de Amarante.

	Litologias	Amostras	Rn	αTotal	βTotal	Observações
Unidades		N	(%)	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	
Valor limite			1000 Bq L^{-1}	0,1 Bq L^{-1}	1 Bq L^{-1}	
Amarante	GAM	12	99-2295	0-0.83	0.14-0.72	Água subterrânea
	MTS	1	31	0.14	0.22	Água subterrânea

GAM: Granito de Amarante; MTS: Metasedimentos

As concentrações de radão e alfa total medidas nas águas da região granítica do maciço tardi-tectónico de Amarante são variáveis, atingindo um máximo de radão de 2295 Bq/L e alfa total de 0.83 Bq/L (Figura 25). A amostra de água superficial foi a que evidenciou o valor mais baixo de teor de radão (3 Bq/L) tal se justifica devido à evaporação do gás para a atmosfera quando a água entra em contacto com a mesma. O valor mais elevado foi de 2295 Bq/L e correspondia a uma nascente onde a população se abastecia com regularidade.

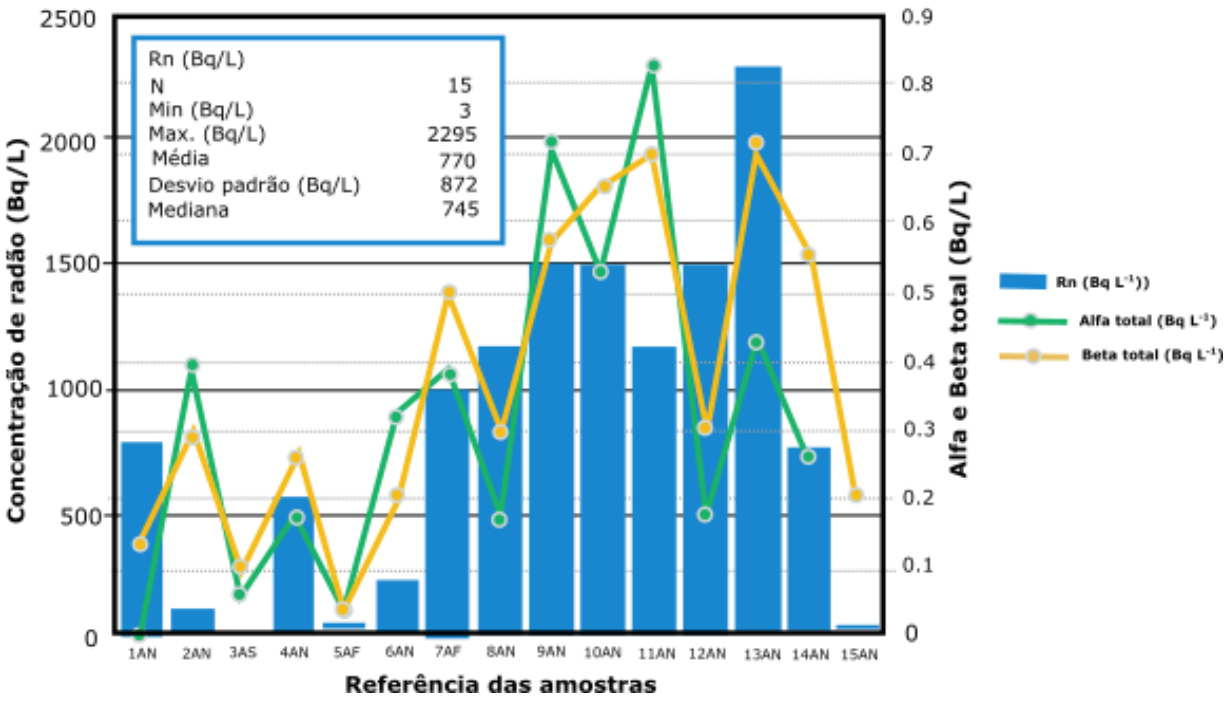

Figura 25 - Parâmetros radiológicos (radão, α e β totais) em águas subterrâneas e águas superficiais da região de Amarante (adaptado de Martins et al., 2013b).

O valor máximo de radão verificado para as amostras 1, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 encontram-se acima do valor máximo recomendado para o ser humano (Recomendação da UE nº98/83/CE; VL= 1000 Bq/L), enquanto a atividade alfa total para as amostras 9, 10, 11 e 13 regista valores máximo superiores ao previsto no DL nº306/2007 (VL=0,1 Bq L^{-1}). Em todas as amostras recolhidas não foram detetados valores de beta total acima do limite permitido.

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise de todos os dados recolhidos referentes aos teores de radão é possível afirmar que o concelho de Amarante, devido à sua litologia, é bastante afetado pela radioatividade natural.

Apesar dos dados de 2013 possuírem valores muito mais significativos, como é o caso do maior valor registado de 2295 Bq/L, do que os dados de 2019 e 2020, onde o maior valor registado é de 516 Bq/L, podemos verificar que atualmente existe um registo de valores acima do valor paramétrico definido pela legislação nacional.

Estes incumprimentos resultam das características naturais hidrogeológicas da origem de água, no entanto, apenas são tomadas medidas de correção conforme referido na nota 9 da Parte III do Anexo I do Decreto-Lei nº152/2017 de 7 de dezembro: "Sempre que as concentrações de radão excedam 1000Bq/L considera-se que se justificam medidas de correção por motivos de proteção radiológica".

Uma vez que a ERSAR utiliza dados fornecidos pelas entidades competentes, foi consultado o relatório das Águas do Norte referente ao segundo trimestre de 2020 onde surge o valor de 516 Bq/L no Fontanário de Covelas, onde em nota vinha esclarecido que o incumprimento teve uma duração de 14 dias.

É expectável que os valores da concentração de radão na água não sejam constantes ao longo do ano uma vez que há diversos fatores que influenciam os mesmos. Neste caso, houve uma diminuição da concentração de radão na água no segundo trimestre do ano, ou seja, ao longo dos meses de abril, maio e junho, uma vez que ao longo destes meses ocorre um aumento da temperatura o que favorece a dissipação do radão para a atmosfera, diminuindo a sua concentração na água.

Ao longo da elaboração da presente dissertação a obtenção de dados não foi de todo um processo facilitado, quero com isto dizer que, para um concelho onde esta problemática da radioatividade natural está tão presente, existe uma falta de informação para com a população.

Após a consulta do site da Câmara Municipal de Amarante pude verificar que apenas se apresentavam os relatórios das análises dos fontanários existentes no centro da cidade, e eram efetuadas apenas as análises a alguns parâmetros como o pH, turvação, condutividade, cor, nitritos, nitratos, nº de colónias, entre outros. No entanto, nenhum relatório apresentava valores relativos à concentração de radão, alfa total, beta total e dose indicativa que são parâmetros de interesse na questão das medições relativas à radioatividade natural.

Uma vez que a população utiliza com frequência diversos fontanários existentes por todas as freguesias do concelho, é de extrema importância haver informação disponível acerca destes parâmetros uma vez que a exposição à radioatividade natural possui uma influência direta na saúde humana.

CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Zoughool, M., Krewski, D. (2009) – Health effects of radon: a review of the literature. International Journal of Radiation Biology 85(1): 57-69. doi:10.1080/09553000802635054;

Appleton, J.D., Ball, T.K. (1995) – Radon and Background Radioactivity from Natural Sources: Characteristics, Extent and Relevance to Planning and Development in Great Britain. British Geological Survey, Technical Report WP/95/2;

Appleton, J., Miles, J. Young, M. (2011) – Comparison of Northern Ireland radon maps based on indoor radon measurements and geology with maps derived by predictive modelling of airborne radiometric and ground permeability data, Science of the Total Environmental Environment, 409- Elsevier, 1572-1583;

Atlas Climático Ibérico, 2011 – Departamento de Producción da Agência Estatal de Meteorologia de Espanha – Área de Climatología y Aplicaciones Operativa, e Departamento de Meteorologia e Clima – Divisão de Observação Meteorológica e Clima do Instituto de Meteorologia de Portugal;

Batista M.J., Torres L., Leote J., Prazeres C., Saraiva J., Carvalho J. (2013) – Carta Radiométrica de Portugal (1:500 000). Laboratório Nacional de Energia e Geologia. ISBN:978-989-675-027-5;

Celik, N., Cevik, U., Celik, A. e Kucukomeroglu, B. (2008) – Determination of indoor radon and soil radioactivity levels in Giresun, Turkey. Journal of environmental radioactivity 99(8): 1349-1354;

Coch, N.K. (1995) – Geohazards Natural and Human. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 481 p;

Coelho, F.M.P.N. (2006) – Distribuição da Radão em Habitações da Região de Vila Real: Condicionantes Geológicas. Tese de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;

Cothern C.R., Smith, J.E. (1987) – Environmental Radon. Volume 35. Plenum Press, New York;

Coutinho, R. M. S. (2000) – Elementos para a Monitorização Sismovulcânica da Ilha do Faial (Açores): Caracterização Hidrogeológica e Avaliação de Anomalias de Rn Associadas a Fenómenos de Desgaseificação. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia, Universidade dos Açores, 343p;

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

EPA (2017a) – Radiation Basic - types of ionizing radiation;

Essenwager, O. M. (2001) – General Climatology 1C: Classification of Climates. Elsevier Science;

Etiope, G. e Martinelli, G. (2002) – Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 129, 185-204;

Eurofins Lab Environment Testing Portugal (2016) – Análise de parâmetros radiológicos em águas de consumo humano, newsletter 01;

FAO (2014) – World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations;

Fernandes, R., Duarte, A. (2008) – Qualidade radiológica da água para consumo humano, XIII SILUBESA – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental;

García-Talavera, M., Quintana, B., García-Díez, E. e Fernández, F. (2001) – Studies on radioctivity in aerossol as a function of meteorological variables in Salamanca (Spain). Atmospheric Environment, 35, 221-229;

Gray, A., Read, S., Mcgale, P., Darby, S. (2009) – Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. BMJ 338: a3110. doi:10.1136/bmj.a3110;

Greeman, D. J. e Rose, A. W. (1996) – Factors controlling the emanation of radon and thoron in soils of the eastern U.S.A.. Chemical Geology, 129, 1-14;

Guerra, C. (2014) – Monitorização de radão em ambientes interiores, aplicação ao SPACE4U (Fundação São João de Deus) e sede da Quercus - Guarda, dissertação de licenciatura em Engenharia do Ambiente, Instituto Politécnico da Guarda;

IAEA (2003) – International Atomic Energy Agency: Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, Vienna, 2003;

IAEA (2011) – IAEA annual report 2011, consultado em https://www.iaea.org/;

ICRP 26 (1977) – Recommendations of the International Commission on Radiation Protection, Annals of ICRP, vol. 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford, 1977;

IPCC (2009) – Intergovermental Panel on Climate Change;

Joint Research Centre (2019) – European Atlas of Natural Radiation. Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.) Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019. ISBN 978-92-76-08259-0, doi:10.2760/520053, Catalogue number KJ-02-19-425-EN-C, EUR 19425 EN. Printed by Bietlot in Belgium 2019 – 190 pp. – 30.1 × 42.4 cm;

Jones & Atkins (2012) –Princípios de Química, questionando a vida moderna e o meio ambiente, 5ª edição;

Leote, J., Silva, M. (1993) – *Carta de radiação gama, folha 2 - Trás-os-Montes*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa;

Manikandan, N. M., Selvasekarapandian, S., Sivakumae, R., Raghunath, V. M., Sundaram, V. M. e Santhanem (2002) – Radon and thoron progeny levels in air samples at Udagamandalam region of Nilgiris in India. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 252, No. 2, 249-254;

Martins et al., (2010) – Dados preliminares da radioatividade natural na região de Amarante (Norte de Portugal);

Martins et al., (2013a) – A radioatividade Natural das Regiões de Amarante e Vila Real (Norte de Portugal);

Martins et al., (2013b) – Radão e saúde na região de Amarante (Norte de Portugal);

Martins, P. (2014) – A abordagem da radioatividade no ensino em Portugal – uma lacuna nos currículos do ensino básico e secundário, dissertação de Mestrado em Ensino de Física e de Química no 3º ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias;

Monitorização da Radioatividade em Água para Consumo Humano em Portugal Continental – Avaliação do Risco, Laboratório de Radioatividade Natural, Universidade de Coimbra, Outubro 2020;

Nikezic, D., Yu, K. (2002) – Distribution of specific energy in sensitive layers of human respiratory tract, Radiation Research, 157, pp. 92-98;

Pereira, A., Domingos, F. (2019) – Monitorização da radioatividade em água para consumo humano em Portugal Continental: avaliação do risco, Laboratório de Radioatividade Natural, Universidade de Coimbra;

Pereira, A., Domingos, F. (2020) – Monitorização da radioatividade em água para consumo humano em Portugal Continental: avaliação do risco, Laboratório de Radioatividade Natural, Universidade de Coimbra, 112 pp;

Pereira, A.J.S.C.; Neves, L.J.P.F., Abrantes, L.M.C.B.L. (2003) – O Gás Radão em Águas Subterrâneas: o caso da Região de Oliveira do Hospital (Portugal Central). IV Congresso Ibérico de Geoquímica e XIII Semana de Geoquímica, Coimbra, Resumos, pp. 304-306.

Pereira, E. (1989) – Notícia explicativa da Folha 10-A Celorico de Basto. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 53 p;

Pereira, E. (2006) – Carta Geológica de Portugal à escala 1:200.000 (folha 2). Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa.

Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios de Amarante 2016-2020, Caderno I;

Santos, T.O., Rocha, Z., Cruz, P., Gouveia, V.A., Siqueira, J.B., Oliveira, A.H. (2014) – Radon dose assessment in underground mines in Brazil. Radiation Protection Dosimetry 160(1-3): 120-123. doi:10.1093/rpd/ncu066;

Saraiva et al. (1998) – Carta de Radiação Gamma Natural de Portugal à escala 1:200000, I.G.M. e Direção-Geral do Ambiente;

Schmid, K., Kuwet, T., Drexler, H. (2010) – Radon in Indoor Spaces. An underestimated risk factor for lung cancer in environmental medicine. Deutsches Ärzteblatt International 107(11): 181–186. doi:10.3238/arztebl.2010.0181;

Schumann, R. R. e Gundersen, L. C. S. (1996) – Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient. Environmental International, Vol. 22, Suppl. 1, S439-S446;

Singh, S., Kumar, A., e Singh, B. (2005a) – Passive integrating rádon studies for environmental monitoring in Hamirpur district, Himachal Pradesh, India using solid state nuclear track detectors. Radiation Measurements, 39, 81-85;

Spencer Lima, L. (2014) – Revista de Ciência Elementar, 2(04):0110;

USEPA – U.S. Environmenta Protection Agency, consultado em https://www.epa.gov/radon;

USEPA (2007) – Ionizing Radiation Fact Book. Office of Air and Radiation, Office of Radiation and Indoor Air. EPA-402-F-06-061, March;

Wiegand, J. (2001) – A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. Environmental Geology, 40, 949-963;

World Health Organization (2009) – WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*, WHO.*

Legislação

Decreto-Lei nº 23/2016 de 3 de junho – Requisitos para a proteção da saúde do público em geral no que diz respeito às substâncias radioativas presentes na água destinada ao consumo humano, D.R. Série I de 2016-02-03, pp 362 – 362;

Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de agosto – Qualidade da água destinada ao consumo humano. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Diário da República nº 167, Série I de 2007-08-27; pp. 5747 – 5765;

Decreto-Lei nº152/2017 de 7 de dezembro – Altera o regime da qualidade da água para consumo humano, Diário da República n.º 235/2017, Série I de 2017-12-07;

Diretiva do Conselho (2012) – Diretiva que estabelece requisitos para a proteção da saúde do público em geral no que diz respeito às substâncias radioativas presentes na água destinada ao consumo humano C7-0105/12, Comissão Europeia COM(2012) 147 fina; l2012/0074 (NLE) C7-0105/12 Bruxelas, 28.3.2012

Diretiva do Conselho nº98/83/CE de 03/11/1998 – Qualidade da água destinada ao consumo humano: Documento nº 20210.