



LABORATÓRIO DE **RADIOACTIVIDADE** NATURAL
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



INSTITUTO DO AMBIENTE
TECNOLOGIA E VIDA

**MONITORIZAÇÃO DA ATIVIDADE DE RADÃO NO
INTERIOR DE EDIFÍCIOS EM
PORTUGAL CONTINENTAL:
AVALIAÇÃO DE RISCO**

Laboratório de Radioatividade Natural

Universidade de Coimbra

Fevereiro de 2021

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE.....	2
3. BASES DE DADOS DE APOIO À MODELAÇÃO DO RISCO	8
3.1. Concentração de radão medida no interior de edifícios (CRE)	10
3.2. Concentração de radão medida em solos (CRS).....	11
3.3. Concentração de urânio em amostras de rocha.....	12
3.4. Concentração de atividade de Ra-226 em amostras de rocha	12
3.5. Taxa de exposição a radiação gama (TERG)	13
4. ANÁLISE DE DADOS	14
4.1. Análise estatística sumária dos dados disponíveis	14
4.3. Caracterização das unidades geológicas com base nos dados disponíveis.....	29
5. AVALIAÇÃO DO RISCO RADIOLÓGICO.....	36
5.1. Métodos e critérios na avaliação de risco.....	36
5.2. Mapa de risco de exposição ao radão na atmosfera interior de edifícios	44
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
7. REFERÊNCIAS	51
8. ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis.....	15
Tabela 4.2 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis de concentração de atividade de radão em edifícios (em Bq/m ³) por unidade geológica. N – Número de amostras; % N > NR representa a percentagem de medições efetuadas com resultado superior ao nível de referência (NR) de 300 Bq/m ³ ; (*) Mediana superior ao valor de referência; nd – não determinado.	29
Tabela 4.3 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis da concentração de atividade de radão em solos (em Bq/m ³) por unidade geológica. N – Número de amostras; nd – não determinado.....	30
Tabela 4.4 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis de concentração de U (em mg/kg) por unidade geológica. N – Número de amostras; nd – não determinado.	31
Tabela 4.5 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis da concentração de atividade de Ra-226 (em Bq/kg) em edifícios por unidade geológica. N – Número de amostras; nd – não determinado.....	33
Tabela 4.6 – Densidade de amostragem (número de amostras por 100 km ²) por unidade geológica para as bases de dados de concentração de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), concentração de U (mg/kg) e atividade de Ra-226 (Bq/kg) medidas em rocha. sd – sem dados.	34
Tabela 5.1 – Matriz de confusão para registo dos cenários possíveis de um sistema de classificação binário em função do critério definido onde <i>PE</i> é a percentagem de edifícios, <i>1</i> indica ZSER, <i>0</i> indica não-ZSER, <i>Med</i> é a mediana e <i>I*</i> é o limite classificador definido.....	37
Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados para a determinação do valor ótimo na curva ROC (VP - Verdadeiros positivos; VN – Verdadeiros negativos; FP – Falsos positivos; FN – Falsos negativos).....	39
Tabela 5.3 – Classificação binária por base de dados (1 – é esperada uma concentração de radão em edifícios superior a 300 Bq/m ³ em pelo menos 10 % dos edifícios; 0 – não é esperada uma concentração de radão em edifícios superior a 300 Bq/m ³ em pelo menos 10 % dos edifícios; nd – não determinado por inexistência de dados) e índice de risco por unidade geológica.	42
Tabela 5.4 – Classificação das unidades geológicas e respetiva descrição (adaptada de LNEG, 2020) de acordo com o nível de risco estimado com base no índice de risco da Tabela 5.3.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – a) Série de decaimento do isótopo U-238; b) Série de decaimento do isótopo U-235. Adaptado do Repositório Digital da Commons Wikimedia.....	8
Figura 3.2 – Modelo conceptual que relaciona as variáveis analisadas no âmbito do presente documento.	9
Figura 4.1 – Diagramas de Quantis para uma distribuição normal da atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), da concentração de U e concentração de atividade de Ra-226 medidas em amostras de rocha colhidas em território continental.	16
Figura 4.2 – Diagramas de Quantis para uma distribuição log-normal da atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), da concentração de U e concentração de atividade de Ra-226 medidas em amostras de rocha colhidas no território continental.	17
Figura 4.3 – Diagrama de extremos e quartis da concentração de atividade de radão medida em edifícios (CRE) e em solos (CRS), U (em mg/kg) e concentração de atividade de Ra-226 (Bq/kg) medidas em amostras de rochas e da mediana da taxa de exposição a radiação gama (TERG) nas diversas unidades geológicas aflorantes no território continental. As linhas a vermelho correspondem à mediana das bases de dados respetivas.....	18
Figura 4.4 – Diagramas de dispersão da mediana por unidade geológica entre a base de dados de concentração de radão em edifícios (CRE, em Bq/m ³) e as bases de dados de U (mg/kg) e Ra-226 (Bq/kg) em amostras de rocha, TERG (nGy/h) e concentração de radão em solos (Bq/m ³). É indicado no canto superior esquerdo o resultado do coeficiente de correlação de Spearman (R).....	19
Figura 4.5 – Semivariogramas da atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), e da atividade de Ra-226 medida em amostras de rocha. A linha a azul indica a estimativa do efeito de pepita.	21
Figura 4.6 – Distribuição espacial dos locais onde foram efetuadas medições da concentração de atividade de radão no interior de edifícios, efetuadas durante 2020 e em períodos anteriores.	22
Figura 4.7 – Distribuição espacial da concentração de atividade de radão no interior de edifícios (em Bq/m ³). LLD corresponde ao limite de deteção inferior.	23
Figura 4.8 – Distribuição espacial da concentração de atividade de radão em solos (em Bq/m ³). LLD corresponde ao limite de deteção inferior (de 1 000 Bq/m ³) e ULD ao limite de deteção superior (de 2 000 000 Bq/m ³).....	24
Figura 4.9 – Distribuição espacial da concentração de atividade de Ra-226 (Bq/kg). LLD corresponde ao limite de deteção inferior (de 4,1 Bq/kg).....	25

Figura 4.10 – Distribuição espacial da mediana da concentração de atividade de Ra-226 (Bq/kg) por unidade geológica no território nacional. Em branco, áreas sem informação disponível.	26
Figura 4.11 – Distribuição espacial da mediana da concentração de U (mg/kg) por unidade geológica no território nacional. Em branco, áreas sem informação disponível.	27
Figura 4.12 – Distribuição espacial da TERG (nGy/h) adaptada de Batista et al., (2013), à qual se encontra sobreposta a Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010).	28
Figura 5.1 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de concentração de radão nos solos (CRS em Bq/m ³). O VO é de 14599,2 Bq/m ³ . É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.	39
Figura 5.2 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de U em rocha (em mg/kg). O VO é de 3,9 mg/kg. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.	40
Figura 5.3 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de Ra-226 em rocha (em Bq/kg). O VO é de 32,1 Bq/kg. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.	40
Figura 5.4 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de TERG (em nGy/h). O VO é de 79,7 nGy/h. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.	41
Figura 5.5 – Mapa de risco de exposição ao gás radão em edifícios no território continental.	48
Figura 5.6 – Diagramas de extremos e quartis de todos os resultados obtidos para as diferentes variáveis por nível de risco (baixo, médio e elevado). No gráfico de CRE, a linha a vermelho indica o nível de referência e os asteriscos representam o percentil 90. Os resultados do teste de Kruskal-Wallis (com dois graus de liberdade) indicados no canto inferior direito revelam que existem diferenças significativas entre os níveis de risco e para todas as variáveis.	49

1. INTRODUÇÃO

À solicitação da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), foi definido e implementado um plano de trabalhos com o objetivo de elaborar um mapa de risco por exposição ao gás radão no interior das habitações localizadas no território continental português. Os trabalhos foram conduzidos por uma equipa do Laboratório de Radioatividade Natural da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (LRN-UC), sob a coordenação do seu Diretor, Prof. Alcides Pereira, e participação maioritária dos seguintes membros: Filipa Domingos, Sérgio Seco e Gustavo Santiago Luís.

A consecução do objetivo principal proposto neste trabalho pressupôs a realização prévia de uma campanha para medição da concentração do gás radão no interior de alguns milhares de habitações dispersas no território continental, e focalizada em áreas geográficas onde a informação disponível era inexistente ou limitada. Na seleção e distribuição dos detetores, e para além dos voluntários que disponibilizaram as suas habitações para o estudo, intervieram também ativamente algumas dezenas de colaboradores de diversos setores da sociedade civil e que serviram de nós de ligação de uma vasta rede, que se estendeu a todo o território continental. A esta base de dados acrescem os dados já disponíveis no LRN-UC para o mesmo parâmetro radiológico, e obtidos na base do mesmo protocolo e da mesma técnica usada no presente estudo. Em ambos os casos o plano de amostragem teve por suporte as unidades geológicas, cartografadas como exposto na carta geológica de Portugal, à escala 1:1 000 000, da responsabilidade do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

Atendendo a que não há um protocolo estandardizado a nível internacional para o mapeamento do risco por exposição ao gás radão, analisaram-se as diferentes abordagens propostas na literatura especializada, discutidas seguidamente no tópico “Estado da Arte”. A solução proposta integra ainda, para além da informação sobre as concentrações do gás radão no interior das habitações, os dados disponíveis sobre as componentes geogénicas que controlam a produção do gás no substrato geológico, a sua migração e transferência para as habitações. O acervo de dados a usar na modelação do risco será então composto pelos obtidos na campanha nacional do radão e os disponíveis na literatura ou resultantes de trabalhos de investigação ou de prestação de serviços executados nos últimos 20 anos no LRN-UC. Os resultados da modelação, agrupados por diferentes níveis de risco alocados a cada unidade geológica, são expressos sob a forma visual e no formato de um mapa, à escala 1:1 000 000.

2. ESTADO DA ARTE

A Diretiva 2013/59/Euratom, do Conselho, de 5 de dezembro de 2013, fixa as normas básicas de segurança para a proteção contra os perigos decorrentes da exposição a radiação ionizante, tendo revogado as Diretivas 89/618/Euratom, do Conselho, de 27 de novembro de 1989, 90/641/Euratom, do Conselho, de 4 de dezembro de 1990, 96/29/Euratom, do Conselho, de 13 de maio de 1996, 97/43/Euratom, do Conselho, de 13 de maio de 1996, e 2003/122/Euratom, do Conselho, de 22 de dezembro de 2003. O artigo n.º 103 da referida Diretiva estabelece que os Estados-Membros devem elaborar um plano nacional de ação contra o radão (PNACR) que tem como principal objetivo reduzir a concentração de radão quer em edifícios existentes, quer em edifícios futuros. O PNACR implica estabelecer um nível de referência para o radão, promover a redução da concentração de radão e consequente exposição para um nível ótimo de proteção radiológica, priorizar as ações que permitam reduzir a concentração de radão nas situações que essa redução seja mais eficaz e incluir medidas preventivas e ações corretivas contra a entrada de radão em edifícios, em regulamentação do domínio da construção civil (IAEA, 2014). O PNACR deve ainda permitir identificar as zonas onde se prevê que a média anual da concentração de radão venha a exceder o nível nacional de referência (NR), pertinente ao Estado-Membro, num número significativo de edifícios.

Em Portugal, a Diretiva 2013/59/Euratom, do Conselho, de 5 de dezembro de 2013 foi transposta para ordem jurídica interna pelo Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro. O artigo n.º 4 do referido Decreto-Lei define o NR como “o nível da dose efetiva, ou da dose equivalente ou da concentração de atividade acima do qual, numa situação de exposição de emergência ou numa situação de exposição existente, se considera inadequado permitir a exposição dos membros do público como consequência dessa situação de exposição, ainda que não se trate de um limite que não possa ser ultrapassado”. O artigo n.º 145 estabelece que “os níveis de referência a serem aplicados em consideração à exposição por radão são: “a) Para habitações e outros edifícios com altos fatores de ocupação por membros do público, uma concentração média anual de atividade de radão de 300 Bq/m³; e b) Para locais de trabalho, uma concentração média anual de atividade de radão de 300 Bq/m³”. Os elementos necessários para a elaboração do PNACR são enumerados no artigo n.º 150, onde se destaca a necessidade de caracterizar as zonas mais suscetíveis à exposição ao radão (ZSER), nas quais são prioritárias ações de intervenção e remediação no sentido de reduzir o risco de exposição ao gás radão. Esta caracterização implica que sejam definidos a “Abordagem, dados e critérios utilizados na delimitação de zonas ou na definição de outros parâmetros que

podem ser utilizados como indicadores específicos de situações com uma exposição potencialmente elevada ao radão”. Para além da concentração de radão no ar interior dos edifícios, devem-se incluir fatores geogénicos que condicionam espacialmente a origem do gás radão e a sua transferência para o interior dos edifícios, de onde se destacam os tipos de solo e de rocha, a permeabilidade e o teor de rádio (Ra-226) na rocha ou em solo, entre outros.

A identificação das áreas que apresentam um elevado potencial de exposição ao radão, isto é, das ZSER, é uma ferramenta fundamental para permitir a redução do risco de exposição ao radão. O artigo n.º 103 da Diretiva de 2013/59/Euratom do Conselho, de 5 de dezembro de 2013, indica que “os Estados-Membros devem identificar áreas onde seja expectável que a concentração de radão (como média anual) num número significativo de habitações exceda o nível de referência nacional”. Contudo, não fornece indicações para a escolha do número significativo de habitações ou as metodologias a adotar para estimar, direta ou indiretamente, a expectância de excedência das concentrações de radão nas diversas áreas geográficas. Por este motivo têm vindo a ser adotados vários conceitos mais específicos e conseqüentemente diferentes metodologias na delimitação das ZSER bem como na estimativa de parâmetros indicadores dessas zonas (Bossew, 2018; García-Talavera e López, 2019).

Pode assumir-se que o radão presente nos edifícios é proveniente de três fontes: do solo ou material geológico que compõe o substrato do edifício, dos materiais de construção do edifício e o radão presente na água de consumo, neste último caso libertado dentro do edifício pelo uso da água por um processo de degaseificação (e.g., Cinelli *et al.*, 2019). Contudo, reconhece-se que a principal fonte de radão no interior dos edifícios é a que se situa no seu substrato (Bruno, 1983). Assim, a concentração no interior de edifícios (CRE) é condicionada substancialmente por fatores extrínsecos aos edifícios, tais como as características do substrato do edifício (e.g., concentração do isótopo Ra-226 – rádio – radionuclídeo que por desintegração radioativa dá origem ao radão, porosidade e permeabilidade do meio) e as condições ambientais (e.g., temperatura do ar, pressão atmosférica, humidade e velocidade do vento) (e.g., Cinelli *et al.*, 2019). A CRE é ainda controlada por fatores intrínsecos aos edifícios, nomeadamente as características dos edifícios (e.g., materiais de construção, tipo de construção, eficiência energética e estado de conservação), que por sua vez estão relacionadas com outros fatores, como o ano de construção, o tipo de clima, as condições socioeconómicas e ainda os hábitos de ocupação dos edifícios (Kemski *et al.*, 2009).

Quando não existem medições de CRE ou estas são insuficientes, o estudo das propriedades do solo, nomeadamente do seu potencial de emissão e exalação de radão e do potencial de radão geogénico, é uma ferramenta essencial não só para caracterizar localmente o potencial do substrato em proporcionar uma elevada CRE em edifícios a serem construídos, mas também para prever as regiões onde se espera que uma elevada percentagem de edifícios possua valores de CRE elevados (Kemski *et al.*, 1999). Por este motivo, a cartografia do potencial de radão geogénico tem sido amplamente utilizada para prever o risco resultante da exposição ao radão (e.g., Kemski *et al.*, 1999; Barnet *et al.*, 2010; Friedmann e Groller, 2010; Ielsch *et al.*, 2010; Bossew, 2013; Gruber *et al.*, 2013; Szabó *et al.*, 2014; Bossew, 2015b; Cinelli *et al.*, 2015; Pasztor *et al.*, 2016; Bossew, 2017; Ciotoli *et al.*, 2017; Giustini *et al.*, 2019; Petermann *et al.*, 2021).

São geralmente utilizadas duas abordagens no mapeamento do risco de radão: a primeira, considerada direta e preferencial, baseia-se nos resultados de medições de CRE e a segunda, considerada indireta, combina a informação disponível de CRE com outras fontes de informação, das quais se destaca a informação geológica (Mostecak *et al.*, 2018). A metodologia utilizada em cada abordagem é, contudo, distinta entre diferentes autores. Nas abordagens baseadas nas medições de CRE, Dubois (2005) refere como principais diferenças o tipo de edifícios e pisos selecionados nas campanhas de medição de radão, as técnicas de medição (ativas ou passivas), a duração da amostragem e os métodos de mapeamento. A título de exemplo, os métodos de mapeamento da CRE podem ser baseados em unidades administrativas (e.g., Fojtikova *et al.*, 2011), grelhas de referência (e.g., Cinelli *et al.*, 2018), limites geológicos (e.g., Bossew 2015a), métodos de interpolação (e.g., Khanjer e Abdulla, 2017) ou métodos geoestatísticos (e.g., Borgoni *et al.*, 2011). Os métodos diferem também no parâmetro descritivo utilizado, podendo ser apresentados os valores interpolados, parâmetros estatísticos descritivos (tais como a média aritmética, a média geométrica ou a mediana), percentagens de habitações acima do NR, a probabilidade de o NR ser excedido, classes de risco ou ainda um índice de risco como proposto em Bossew *et al.*, 2020. Por último, Tollefsen *et al.*, 2014 refere ainda disparidades significativas na abordagem adotada na aquisição de dados, designadamente na densidade da amostragem que pode ser proporcional à densidade populacional ou homogénea em toda a área considerada, enquanto alguns autores privilegiam a recolha de amostras em zonas onde é esperada uma maior CRE (Dubois, 2005).

As principais limitações dos métodos de estimativa do risco de exposição baseados em medições de CRE são a variabilidade temporal e espacial dos fatores antropogénicos que influenciam a CRE, tais como do estilo de vida e hábitos de ocupação dos edifícios e a

escassez de dados, que condicionam a representatividade da amostra (e.g., Fojtikova *et al.*, 2011; Gruber *et al.*, 2013). A variabilidade espacial e temporal da CRE implica, por vezes, a necessidade de aplicar correções sazonais (e.g., Cinelli *et al.*, 2018) ou de normalizar a CRE para um edifício, piso ou divisão de referência (e.g., Friedmann e Groller, 2010), através de modelos aos quais estão associadas incertezas. Deve ainda considerar-se que, em termos gerais, a maioria dos resultados de CRE disponíveis são obtidos em habitações, contudo, a Diretiva 2013/59/Euratom do Conselho, de 5 de dezembro de 2013, tem como principal foco os locais de trabalho, para os quais não deve ser assumida a mesma distribuição de CRE comparativamente às habitações dada a sua especificidade relativamente a hábitos de ocupação e a tipologia da construção (Bossew, 2018).

As abordagens indiretas para o mapeamento do risco de radão baseiam-se na utilização de variáveis que são usadas como indicadores da CRE tais como dados geológicos, geoquímicos e geofísicos, podendo incluir ou não dados de CRE. Abrangem a concentração de radão medida nos solos, a concentração de radionuclídeos medida em solos ou em rocha, a permeabilidade dos solos ou a taxa de exposição a radiação gama. São também incluídas nas abordagens indiretas outras variáveis que podem afetar a transferência do gás radão do substrato para o interior das habitações tais como as condições climáticas ou as características dos edifícios (e.g., ano de construção, tipo de edifício, materiais de construção) (Gruber *et al.*, 2013).

As variáveis estritamente naturais e caracterizadoras do potencial de emanção e exalação de radão associado ao substrato correspondem ao potencial de radão geogénico, que pode ser estimado essencialmente de duas formas (Gruber *et al.*, 2013): (1) recorrendo a uma aproximação física, tal como o potencial de radão geogénico de Neznal dado pela razão entre a concentração de radão medida e o logaritmo do inverso da permeabilidade medidas em solos (Neznal *et al.*, 2004) ou (2) recorrendo a tabulação cruzada multivariada, na qual diferentes variáveis são utilizadas como indicadores do potencial de radão geogénico. As principais desvantagens da aproximação física incluem a dificuldade em gerar uma amostra representativa devido à variabilidade espacial e temporal das características do solo associada às condições meteorológicas (e.g., Neznal *et al.*, 2004, Petermann *et al.*, 2021).

Os métodos multivariados para o mapeamento do potencial de radão geogénico fazem uso de diversas variáveis categóricas e/ou numéricas, desde a CRE à concentração de radão nos solos (CRS), propriedades físicas, químicas e hidráulicas dos solos ou rochas (e.g., teor em argila, concentração de radionuclídeos, permeabilidade, teor em água), taxa de exposição a radiação gama, cartografia geológica (e.g., litologia, litostratigrafia e tectónica),

cartografia de ocorrências minerais, cartografia hidrogeológica (e.g., localização e caracterização dos aquíferos), condições meteorológicas (e.g., temperatura do ar exterior, precipitação, humidade) e características dos edifícios (e.g., ano de construção, tipo de edifício, materiais de construção), entre outras (e.g., Kemski *et al.*, 1999; Zhu *et al.*, 2001; Chen, 2009; Barnet *et al.*, 2010; Friedmann e Groller, 2010; Ielsch *et al.*, 2010; Borgoni *et al.*, 2011; Bossew, 2013; Gruber *et al.*, 2013; Drolet *et al.*, 2014; Szabó *et al.*, 2014; Bossew, 2015b; Cinelli *et al.*, 2015; Pasztor *et al.*, 2016; Bossew, 2017; Ciotoli *et al.*, 2017; Giustini *et al.*, 2019; Petermann *et al.*, 2021).

Consoante a informação disponível, os autores procuram desenvolver modelos quantitativos que permitam prever a estrutura espacial da variável de interesse (i.e., CRE ou potencial de radão geogénico) recorrendo a técnicas mais ou menos complexas, tais como métodos puramente estatísticos (e.g., Drolet *et al.*, 2013; Drolet *et al.*, 2014), métodos determinísticos de interpolação (e.g., Kemski *et al.*, 1999; Kemski *et al.*, 2001; Szabó *et al.*, 2014, Khanjer e Abdullah, 2017), métodos geoestatísticos (e.g., Zhu *et al.*, 2001; Borgoni *et al.*, 2011; Cinelli *et al.*, 2011, 2015; Gruber *et al.*, 2013; Pasculli *et al.*, 2014; Pasztor *et al.*, 2016; Elio *et al.*, 2018), simulação sequencial gaussiana (e.g., Bossew, 2013), modelos de regressão e mistos (e.g., Sarra *et al.*, 2016; Kropat *et al.*, 2015, Ciotoli *et al.*, 2017; Elio *et al.*, 2017), redes neuronais (e.g., Timkova *et al.*, 2016) e *machine learning* (e.g., Petermann *et al.*, 2021), entre outros (e.g., García-Talavera *et al.*, 2013; Drolet *et al.*, 2014).

Cada método tem vantagens e limitações intrínsecas, contudo, de forma genérica, pode considerar-se que os métodos mais complexos permitem maximizar o uso e proveito dos dados e informação existentes, avaliar a importância relativa das diversas variáveis no modelo final e obter uma melhor performance preditiva comparativamente a métodos mais simples. As suas principais limitações prendem-se com a dificuldade em estimar a incerteza associada aos modelos gerados, com a dependência estreita entre a qualidade do modelo e a representatividade espaço-temporal dos dados de entrada do modelo, com a criação de artefactos em zonas com baixa densidade de informação e com a dificuldade na interpretação do ponto de vista físico das relações entre as variáveis de entrada e o modelo gerado.

Os modelos quantitativos obtidos, que refletem a estrutura espacial da CRE ou do potencial de radão geogénico, permitem determinar as zonas que apresentam maior ou menor suscetibilidade de exposição ao radão. Contudo, de acordo com o artigo n.º 103 da Diretiva de 2013/59/Euratom do Conselho, de 5 de dezembro de 2013, o conceito de ZSER implica que seja estabelecido um NR, de acordo com a legislação em vigor, bem como um número (NE) ou percentagem de edifícios (PE) onde o NR seja ultrapassado, considerado como

limite significativo para definir uma ZSER. A título de exemplo, Espanha, Finlândia, Alemanha, Grécia e Montenegro adotaram como NR a concentração de 300 Bq/m³ e como PE 10 % (Bossew, 2018). Nestes casos, uma determinada zona será considerada como ZSER se a CRE for superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios. A Irlanda e o Reino Unido, adotaram, por sua vez, um NR de 200 Bq/m³ e valores de PE de 10% e de 1%, respetivamente (EPA, 2020; UKRADON 2020). No Reino Unido, uma zona onde 2 % dos edifícios possuem CRE superior a 200 Bq/m³ é considerada como ZSER. Contudo, a mesma zona na Irlanda não seria considerada como ZSER. Poderá assim concluir-se que não existe uma metodologia formalmente aceite quer no mapeamento do risco de exposição ao radão quer na identificação das regiões onde se prevê que o NR seja excedido num número significativo de edifícios (Bossew, 2014, 2018). A abordagem a adotar depende dos dados disponíveis e deve ter como princípio geral maximizar o proveito da informação disponível por forma a obter o modelo que melhor represente a realidade. Já a definição dos limites relevantes (i.e., NR, NE e PE) deve respeitar os princípios gerais da proteção contra radiações expostos no Capítulo II do Decreto-Lei n.º 108, de 3 de dezembro 2018, de modo a assegurar que a probabilidade de ocorrência da exposição elevada, bem como o número de pessoas expostas são mantidos num nível tão baixo quanto razoavelmente possível. Para tal, devem ser tidos em consideração, entre outros fatores, o estado atual do conhecimento a nível nacional do ponto de vista radiológico e as implicações socioeconómicas associadas às medidas de prevenção, proteção e/ou remediação previstas nas ZSER.

3. BASES DE DADOS DE APOIO À MODELAÇÃO DO RISCO

Para proceder ao mapeamento do risco de exposição ao radão, procedeu-se a um levantamento prévio da informação disponível, nomeadamente sobre o urânio total (U) e os isótopos integrados na série de decaimento do isótopo U-238, que se apresenta na Figura 3.1 a); neste último caso destaca-se o isótopo de rádio (Ra-226) e radão (Rn-222). No total, foi possível compilar um total de cinco bases de dados, integrando as concentrações de radão medidas em edifícios (CRE) e em solos (CRS), as concentrações de U e as concentrações de atividade de Ra-226, medidas em amostras de rocha, e ainda a taxa de exposição a radiação gama (TERG). Apresenta-se na Figura 3.2 um modelo conceptual que relaciona estas variáveis. Não se encontram publicadas bases de dados relativas a outros isótopos relevantes no âmbito do presente documento, nomeadamente dados sobre a atividade dos isótopos de Po-210 ou Pb-210.

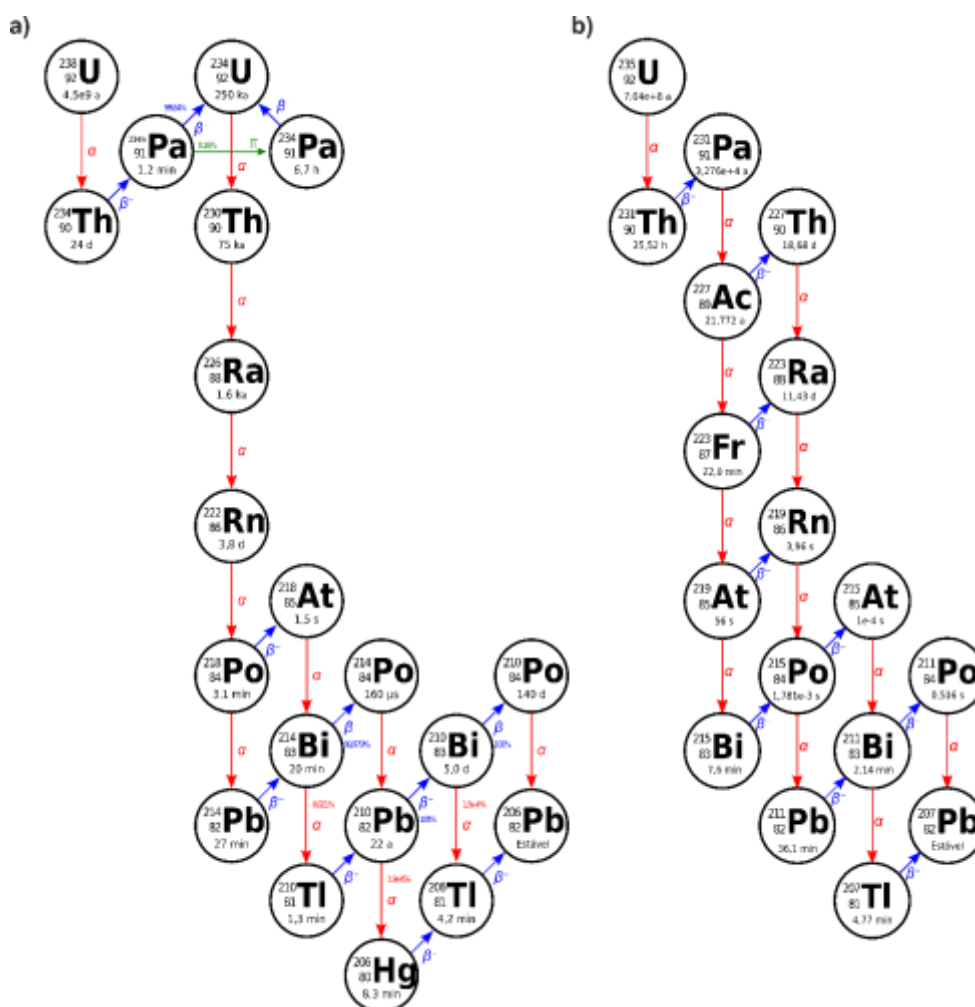


Figura 3.1 – a) Série de decaimento do isótopo U-238; **b)** Série de decaimento do isótopo U-235. Adaptado do Repositório Digital da *Commons Wikimedia*.

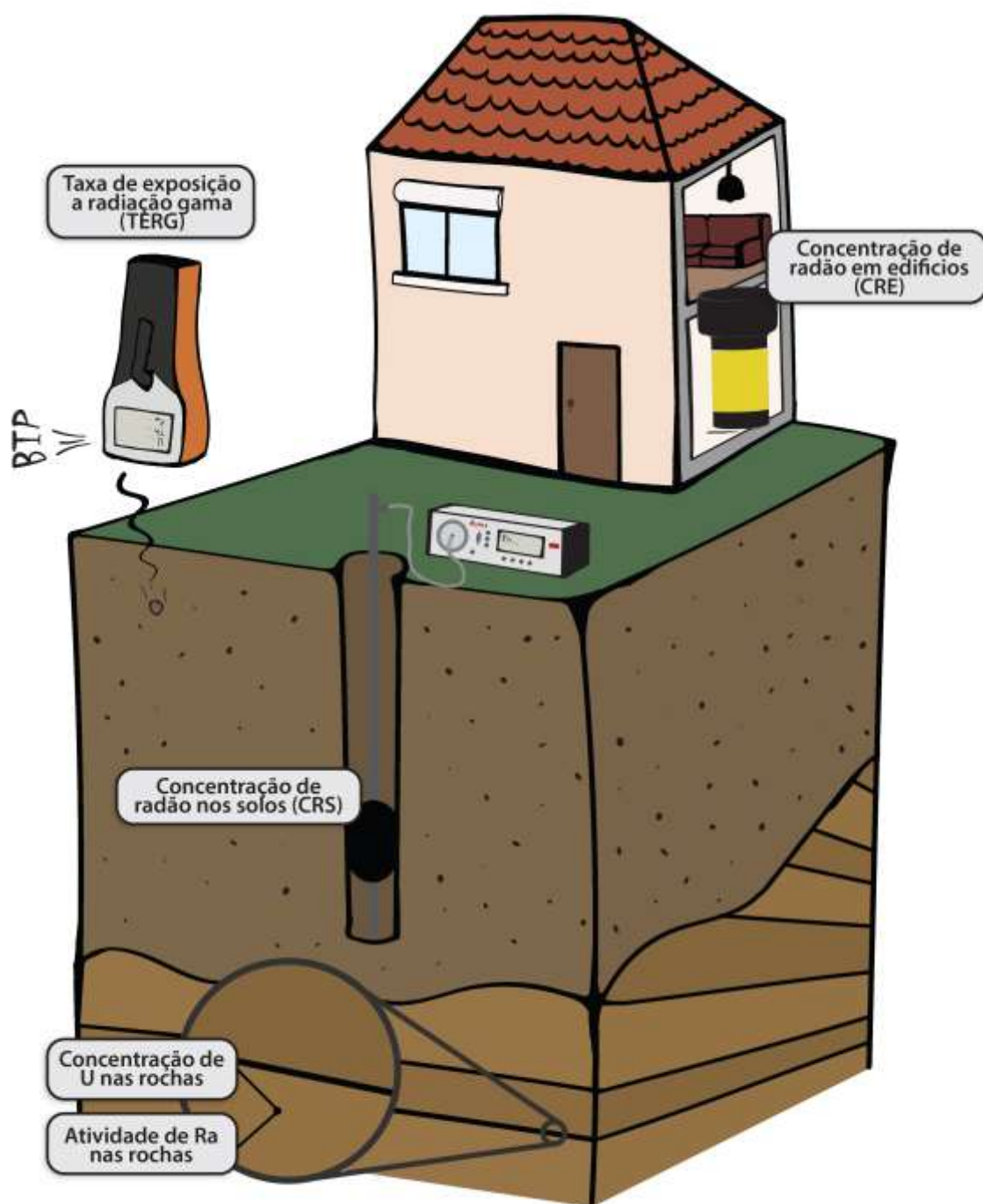


Figura 3.2 – Modelo conceitual que relaciona as variáveis analisadas no âmbito do presente documento.

3.1. Concentração de radão medida no interior de edifícios (CRE)

A base de dados de medições da atividade de radão no interior de edifícios é composta por cerca de 3084 medições da concentração de radão em edifícios (CRE) localizados no território nacional, das quais 2202 foram efetuadas em 2020 e as restantes (882) em períodos anteriores. A recolha de resultados efetuada em 2020 envolveu o envio dos detetores do tipo CR-39 a participantes voluntários que foram responsáveis pela sua colocação nos edifícios. Estes locais foram previamente selecionados na base dos seguintes critérios:

- Pertencerem a uma área geográfica e terem por substrato uma unidade geológica da qual não havia informação disponível ou então era considerada insuficiente;
- Na área geográfica selecionada a distribuição dos detetores teve em conta a dimensão dos aglomerados habitacionais;
- Foi dada preferência a moradias ou a prédios de habitação e, neste último caso, em divisões situadas apenas até ao 1º andar;
- As divisões onde foram colocados os detetores eram as que tinham maior uso por parte dos seus ocupantes, evitando-se, pelas dificuldades de controlar a ventilação, as cozinhas.

Em todos os locais selecionados foi preenchido um formulário onde foi registada informação completar sobre cada um dos locais onde foi colocado o detetor tendo estes dados sido vertidos para uma base de dados para apoio à interpretação dos resultados.

Os detetores foram expostos durante um período médio de 3 meses, de janeiro a maio de 2020. Após a exposição, os detetores foram enviados para análise no LRN-UC. Numa primeira fase os detetores foram sujeitos a revelação química numa solução de hidróxido de sódio (NaOH), a temperatura controlada de 90°C durante um período de 4 horas e meia. A contagem dos traços produzidos no detetor pelas partículas alfa geradas no decaimento do gás radão foi efetuada de forma automática com suporte num microscópio equipado com platina automática e num sistema de análise de imagens desenvolvido pelo fabricante do equipamento (Radosys). Os procedimentos de análise basearam-se na norma ISO 11665-4:2012 estando o laboratório acreditado pelo Instituto Português da Acreditação (IPAC) conforme o anexo técnico de acreditação n.º L0724-1. O limite de deteção inferior (LLD) é de 10 Bq/m³ e a incerteza de 10 a 20 %. Os resultados anteriores a 2020 referem-se à exposição de detetores do mesmo tipo (CR-39) durante um período de exposição idêntico em cujo procedimento utilizado na determinação da atividade de radão a. Estes

resultados foram obtidos em diversas campanhas efetuadas pelo LRN-UC desde 2005 e que, tal como a campanha efetuada em 2020, envolveram a participação de voluntários. Em ambas as campanhas, a localização exata dos edifícios onde se procedeu à exposição dos detetores não é conhecida, tendo sido estimada a sua localização aproximada através do código postal indicado na morada no questionário preenchido pelos participantes voluntários durante a campanha. A informação disponível foi sintetizada por unidade geológica da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010), cuja legenda é apresentada em Anexo. Na análise estatística, os valores abaixo do LLD, de 10 Bq/m³, foram substituídos por 0,55 x LLD de acordo com Sanford *et al.*, (1993).

3.2. Concentração de radão medida em solos (CRS)

A base de dados da concentração de radão em solos (CRS) resulta de um extenso levantamento da CRS em solos efetuado pelo LRN-UC nas principais unidades geológicas aflorantes no território continental. A determinação da atividade de radão nos solos foi efetuada em furos com diâmetro máximo de 22 mm, efetuados por furação à rotação com o auxílio de uma broca por forma a atingir a profundidade mínima de 80 cm. Após a execução de cada furo é instalada uma sonda e feito o isolamento do furo de modo a impedir a entrada de ar atmosférico e consequente contaminação do ar contido no solo (Pereira *et al.*, 2010). A extração do ar contido no solo é feita com o auxílio de uma bomba com caudal constante controlado por microprocessador (de 1 L/min), o que permite recolher aproximadamente o mesmo volume de ar em cada furo. A atividade de radão foi determinada com equipamentos AlphaGuard (PQ2000PRO), equipado com uma câmara de ionização com um volume de 0,62 L e intervalo de medição no intervalo de 2 a 2 000 000 Bq/m³. A atividade de radão considerada para análise estatística corresponde ao valor médio das contagens efetuadas minuto-a-minuto durante um intervalo entre o 3º e o 10º minuto após a recolha da amostra de ar. A base de dados é composta por 2791 observações cuja localização exata é conhecida, sintetizando-se a informação disponível por unidade geológica da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010), cuja legenda é apresentada em Anexo. Os valores abaixo do LLD, de 1000 Bq/m³, e acima do limite de deteção superior (ULD), de 2 000 000 Bq/m³, foram substituídos por 0,55 x LLD e 1,7 x ULD, respetivamente, de acordo com Sanford *et al.*, (1993).

3.3. Concentração de urânio em amostras de rocha

A base de dados de U (mg/kg) integra os resultados obtidos a partir da medição da concentração de U por métodos geoquímicos em amostras de rocha colhidas nas principais unidades geológicas aflorantes em território nacional. Foi obtida a partir de extensa revisão bibliográfica (incluindo artigos científicos, dissertações de mestrado, dissertações de doutoramento e resumos em congressos, entre outros). A revisão bibliográfica foi realizada pelo LRN-UC em parceria com o grupo de monitorização de radioatividade ambiental (REM) do *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia no âmbito da elaboração do mapa de concentração de U em rochas e que consta no Atlas Europeu de Radiação Natural (AERN, publicado on-line em <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/european-atlas-natural-radiation-0>, Cinelli *et al.*, 2019). A metodologia utilizada para a construção da base de dados e sua validação são apresentadas em Domingos *et al.* (2020). Sinteticamente, o resultado de U (mg/kg) retirado de fontes bibliográficas é atribuído a uma unidade geológica da carta geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 de acordo com a localização da amostra quando esta é conhecida, ou, em alternativa, de acordo com as características litológicas, petrográficas ou paleontológicas da amostra (Domingos *et al.*, 2020). Note-se que não é conhecida a localização exata das amostras, o que inibe o uso de métodos geoestatísticos na análise dos resultados (Domingos *et al.*, 2020). A base de dados é constituída por 3515 observações retiradas de 130 referências bibliográficas, e os dados disponíveis foram sintetizados por unidade geológica da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010), cuja legenda é apresentada em Anexo.

3.4. Concentração de atividade de Ra-226 em amostras de rocha

A base de dados de Ra-226 (Bq/kg) integra os resultados obtidos a partir da medição da atividade de Ra-226 em amostras de rocha colhidas nas principais unidades geológicas aflorantes no território continental, cuja localização exata é conhecida. Todas as amostras foram preparadas e analisadas recorrendo à mesma metodologia e que se encontra descrita detalhadamente em Pereira *et al.* (2017). A medição das amostras foi efetuada no LRN-UC em condições de equilíbrio isotópico por espetrometria de raios gama de baixa resolução, com um detetor de NaI (Ortec) através do pico de Bismuto (Bi-214) (1760 keV). A base de dados é composta por 602 observações, sintetizando-se a informação obtida por unidade geológica da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010), cuja legenda é apresentada em Anexo. Os valores abaixo do LLD (de 4,1 Bq/kg) foram substituídos por 0,55 x LLD de acordo com Sanford *et al.*, (1993).

3.5. Taxa de exposição a radiação gama (TERG)

A Carta Radiométrica de Portugal mostra a distribuição da taxa de exposição a radiação gama (TERG) em território nacional, sendo disponibilizada em <http://geoportal.ineg.pt/geoportal/mapas/index.html>. Os dados que permitiram a construção deste modelo foram adquiridos a partir de 1955 através de diversos equipamentos (transportados manualmente, em veículos ou por via aérea), que foram calibrados recorrendo a fontes de radionuclídeos com concentrações conhecidas de urânio, tório e potássio, ou através de medições efetuadas com equipamentos distintos nos mesmos locais (Batista *et al.*, 2012; Grasty *et al.*, 1993). A aquisição de informação tinha como principal objetivo a prospeção mineira pelo que foram tidas em consideração as principais unidades geológicas no processo de aquisição e calibração dos dados (Batista *et al.*, 2012; Grasty *et al.*, 1993; Saraiva *et al.*, 1998; Tauchid & Grasty, 2002; Torres & Grasty, 1993). A Carta Radiométrica de Portugal foi produzida a partir de 841 440 medições (Batista *et al.*, 2012, 2013), com recurso ao método de interpolação linear da curvatura mínima aplicado sobre uma grelha cujas células têm uma dimensão de 250 m x 250 m. Cada ponto na grelha foi estimado recorrendo a pelo menos 10 pontos, localizados num raio de 10 km (Torres *et al.*, 1997; Saraiva *et al.*, 1998). Relativamente a esta base de dados dispõe-se da mediana da TERG por unidade geológica que foi calculada assumindo um valor mínimo de TERG de 0 nGy/h e máximo de 237,6 nGy/h de acordo com Domingos *et al.* (2020).

4. ANÁLISE DE DADOS

4.1. Análise estatística sumária dos dados disponíveis

Na análise estatística, os valores inferiores ao limite de quantificação e/ou limite de detecção foram substituídos pelo produto entre o valor do respetivo limite e um coeficiente de acordo com Sanford *et al.* (1993). Toda a análise estatística foi efetuada em R (R Core Team, 2017) recorrendo aos pacotes *psych* (Revelle, 2018) e *gstat* (Pebesma, 2004; Gräler *et al.*, 2016).

Com suporte nos dados incluídos na base de dados estimaram-se as principais medidas de tendência central (média e mediana) e dispersão (intervalo de variação, dado pelo mínimo e máximo, e desvio-padrão). Foram também determinados o primeiro e terceiro quartil, que caracterizam porções da população de dados, que correspondem a 25% e 75% da distribuição, respetivamente. A assimetria e a curtose visam uma caracterização precisa da forma geométrica da função de distribuição dos valores obtidos.

Os resultados obtidos expressam-se na

Tabela 4.1 salientando-se a divergência entre a média e a mediana, particularmente no caso da atividade de radão em edifícios e em solos. Esta discrepância, bem como os valores de curtose bastante superiores a 3 (valor assumido como de referência da curtose de uma distribuição normal), indicam uma presença significativa de extremos. Observa-se também uma forte assimetria positiva que indica desvios significativos à distribuição normal (caracterizada por assimetria nula). Estes resultados indicam a necessidade de utilização de métodos robustos de análise estatística, nomeadamente a utilização da mediana em detrimento da média na análise de tendência central. No caso da concentração de atividade de radão em edifícios, note-se que cerca de 60 % dos resultados obtidos são superiores a 100 Bq/m³ e 29 % ultrapassam o nível de referência (NR) de 300 Bq/m³ estabelecido no Decreto-Lei n.º 108, de 3 de dezembro 2018.

Apresentam-se os diagramas de Quantil-Quantil para uma distribuição normal na Figura 4.1 e log-normal na Figura 4.2 para os diversos parâmetros radiológicos (radão em edifícios e em solos, U e Ra-226 em amostras de rocha). Os diagramas revelam um afastamento significativo relativamente à distribuição normal, que se justifica pela presença de um número significativo de valores extremos. Deste modo, a distribuição dos parâmetros radiológicos não pode ser considerada normal, indicando a necessidade de utilização de métodos robustos de análise estatística.

Tabela 4.1 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis.

	CRE (Bq/m ³)			CRS (Bq/m ³)	U (mg/kg)	Ra-226 (Bq/kg)
	Anterior a 2020	2020	Total			
Número de amostras	882	2202	3084	2791	3515	602
Média	620	219	334	145205	4,7	47
Desvio-padrão	737	360	530	409632	4,8	49
Mínimo	6	6	6	550	0,0	2
1º Quartil	164	51	62	7859	1,9	22
Mediana	374	98	139	29156	3,3	34
3º Quartil	802	224	372	104432	5,5	59
Máximo	7003	3800	7003	3400000	57,8	588
Assimetria	3,1	4,5	4,1	6,1	3,0	5,4
Curtose	15,3	26,7	26,5	42,0	16,1	49,7

A linearidade observada nos diagramas de quantil-quantil da Figura 4.2 indica que a concentração de atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), bem como a concentração de atividade de Ra-226 medidas em amostras de rocha apresentam uma distribuição aproximadamente log-normal. Contudo, verificam-se desvios significativos a esta distribuição em ambas as caudas, associada à presença de uma quantidade significativa de valores extremos (*outliers*) e de valores inferiores ao limite de deteção. A distribuição de U não deve ser considerada log-normal, sendo multimodal.

Comparando os dados estatísticos obtidos por unidade geológica (cuja legenda é apresentada em Anexo) para cada uma das variáveis verifica-se que, em todos os casos, a tendência é similar, como pode ser observado na Figura 4.3, com os valores mais elevadas a serem obtidos nas rochas ígneas, em especial nas rochas granitóides (e.g., unidades g, g1_a, g1_b, g2_a, g2_b, g3 e gap). Refira-se, no entanto, também a ocorrência de valores significativamente elevados de CRE noutras unidades geológicas, como é o caso de unidades que incluem xistos negros carbonosos (e.g., SA e ODP), unidades sedimentares, integrando materiais de grão fino como argilas, com ou sem matéria orgânica associada (e.g., E, N2, Q2 e K2) e em unidades suscetíveis a fenómenos de carsificação (e.g., J2 e J3). Os valores medianos mais baixos de CRE são observados em unidades metamórficas (e.g., C1_a, O_b, OD1, ep1, ep2, epL e NP2, entre outras),

unidades sedimentares (e.g., J1, J3, K1-2) e/ou metamórficas calcárias (ep1c) e ainda unidades ígneas e/ou metamórficas de caráter máfico (e.g., SDof, CVL, D2-3_a e GAMA).

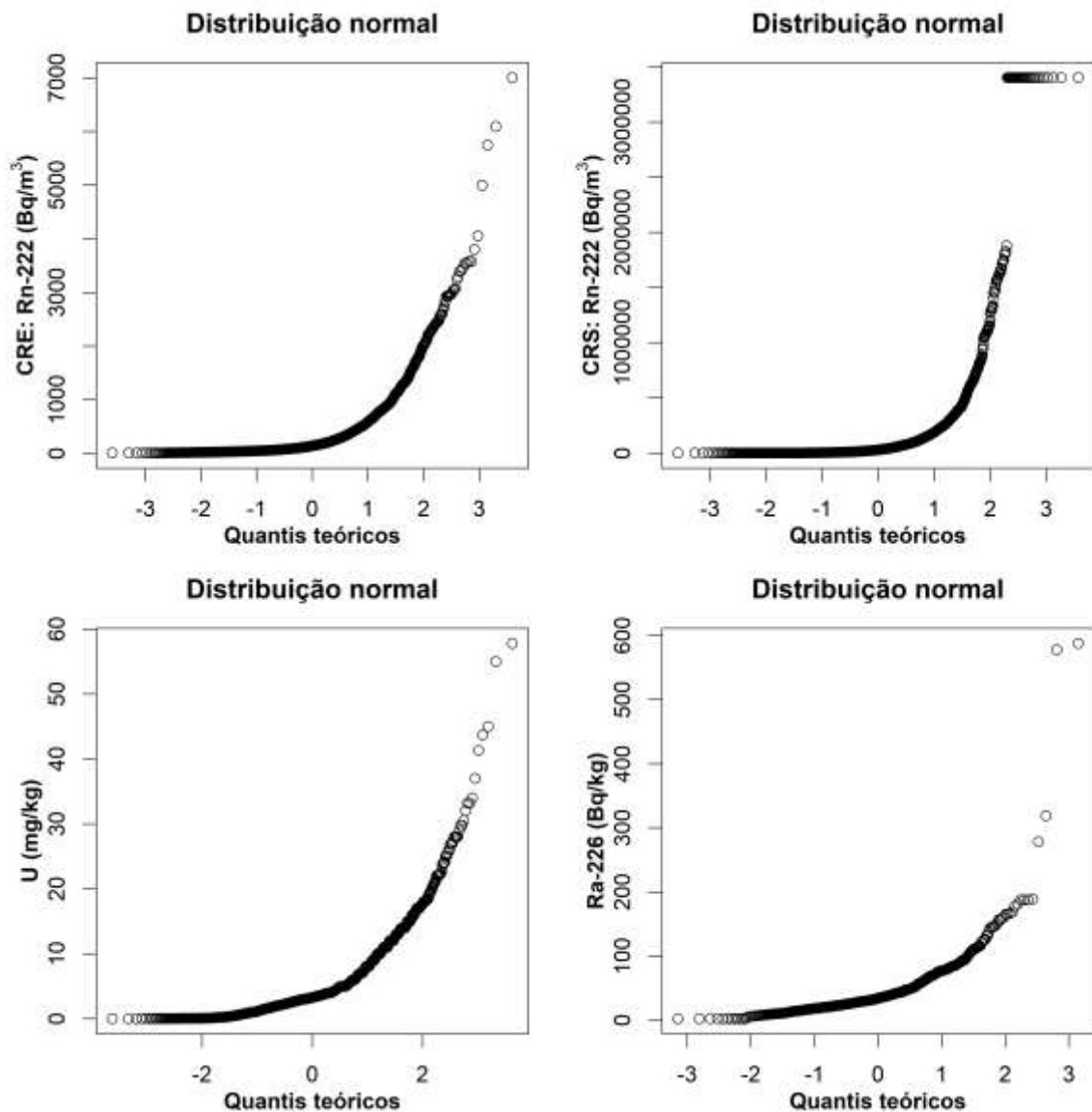


Figura 4.1 – Diagramas de Quantis para uma distribuição normal da atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), da concentração de U e concentração de atividade de Ra-226 medidas em amostras de rocha colhidas em território continental.

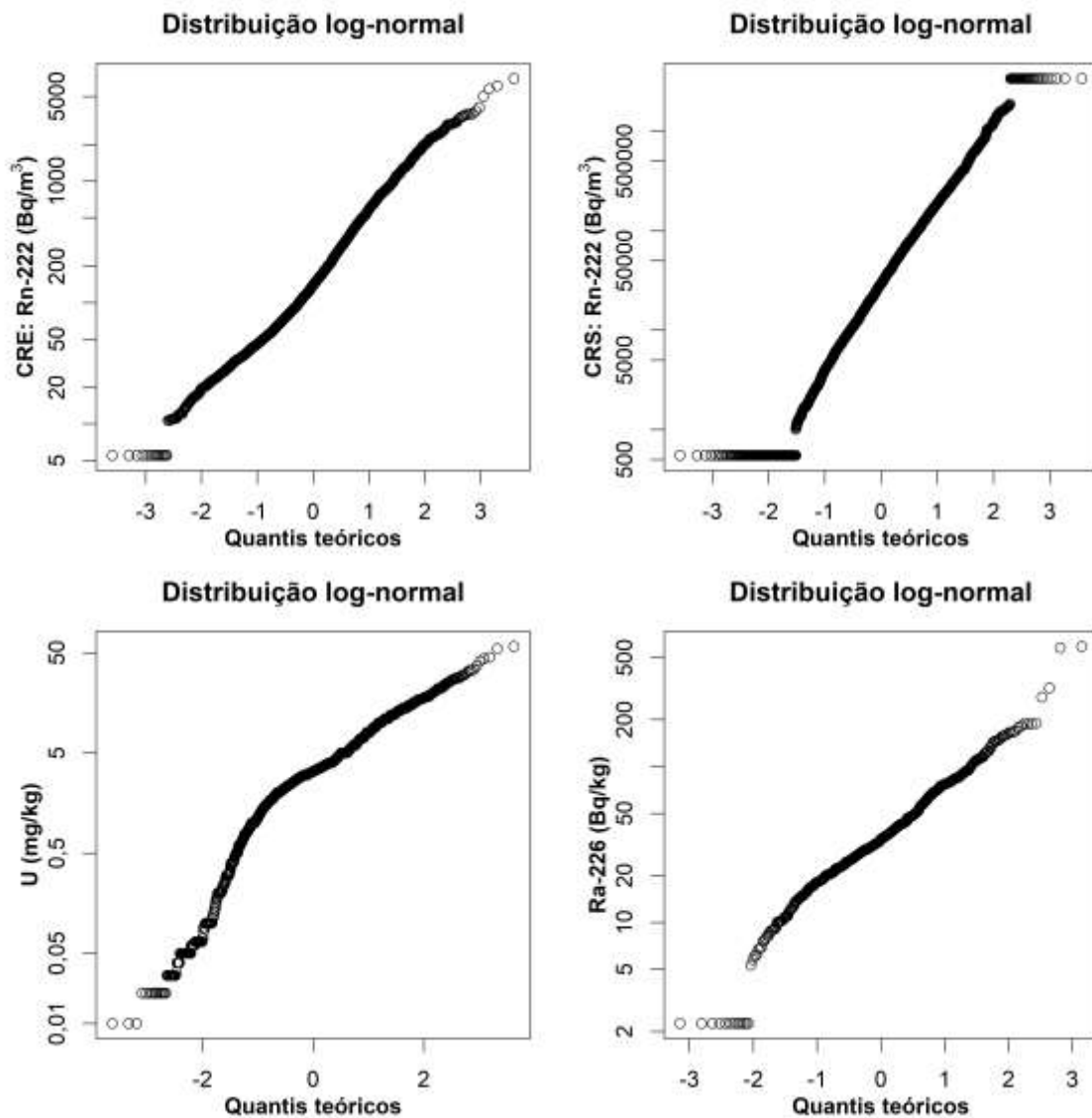


Figura 4.2 – Diagramas de Quantis para uma distribuição log-normal da atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), da concentração de U e concentração de atividade de Ra-226 medidas em amostras de rocha colhidas no território continental.

Os diagramas de dispersão da mediana por unidade geológica entre as diferentes bases de dados (radão em edifícios, U e Ra-226 em amostras de rocha, TERG e radão em solos) expressam-se na Figura 4.4. Em todos os casos são observadas correlações estatisticamente significativas e positivas, moderadas a fortes, entre as variáveis geogénicas e a base de dados que integra as concentrações de atividade do gás radão em edifícios, o que reforça a importância da componente geogénica como estimador do risco

de exposição ao gás radão no interior das habitações.

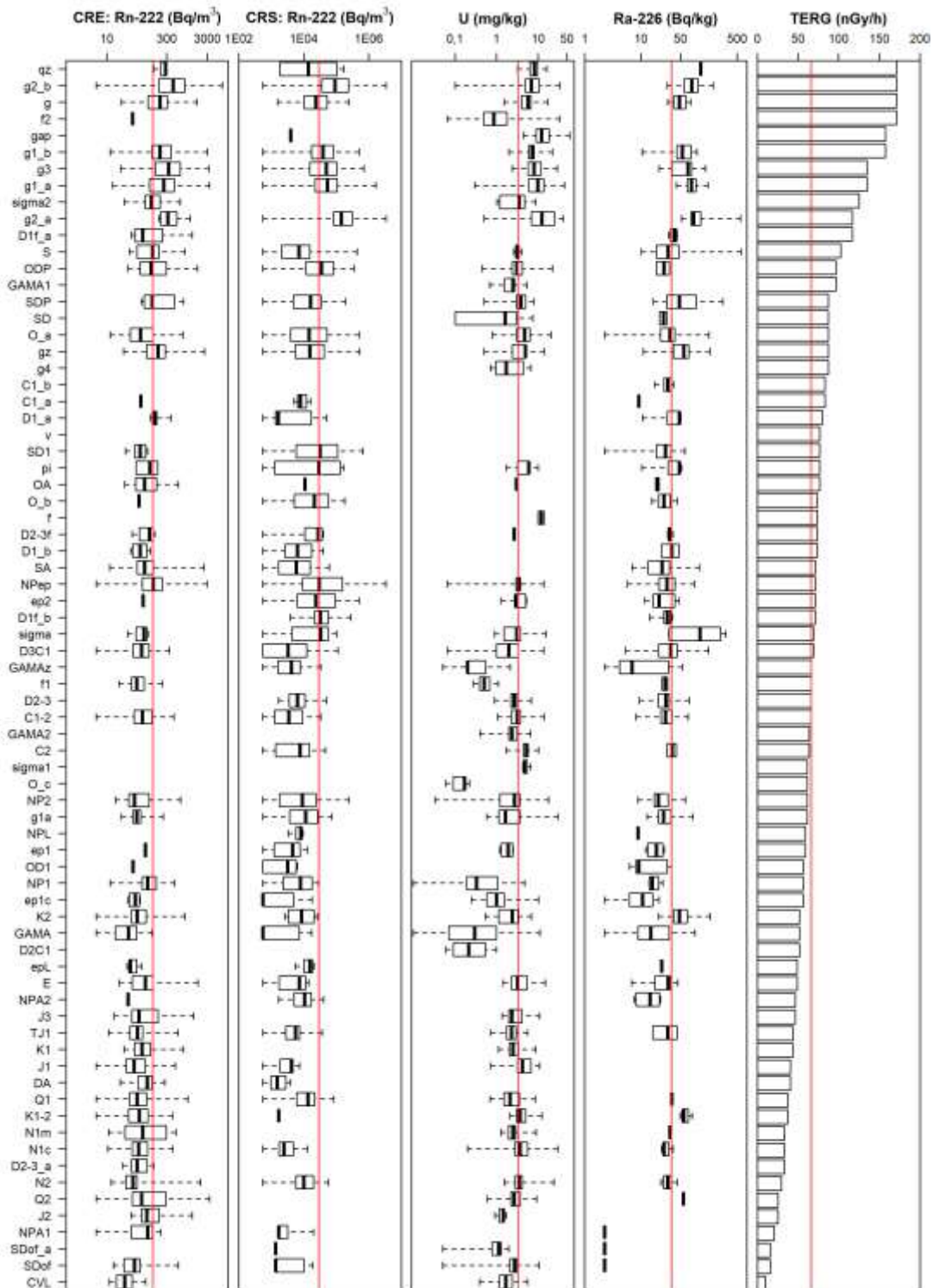


Figura 4.3 – Diagrama de extremos e quartis da concentração de atividade de radão medida em edifícios (CRE) e em solos (CRS), U (em mg/kg) e concentração de atividade de Ra-226 (Bq/kg) medidas em amostras de rochas e da mediana da taxa de exposição a radiação gama (TERG) nas diversas unidades geológicas aflorantes no território continental. As linhas a vermelho correspondem à mediana das bases de dados respetivas.

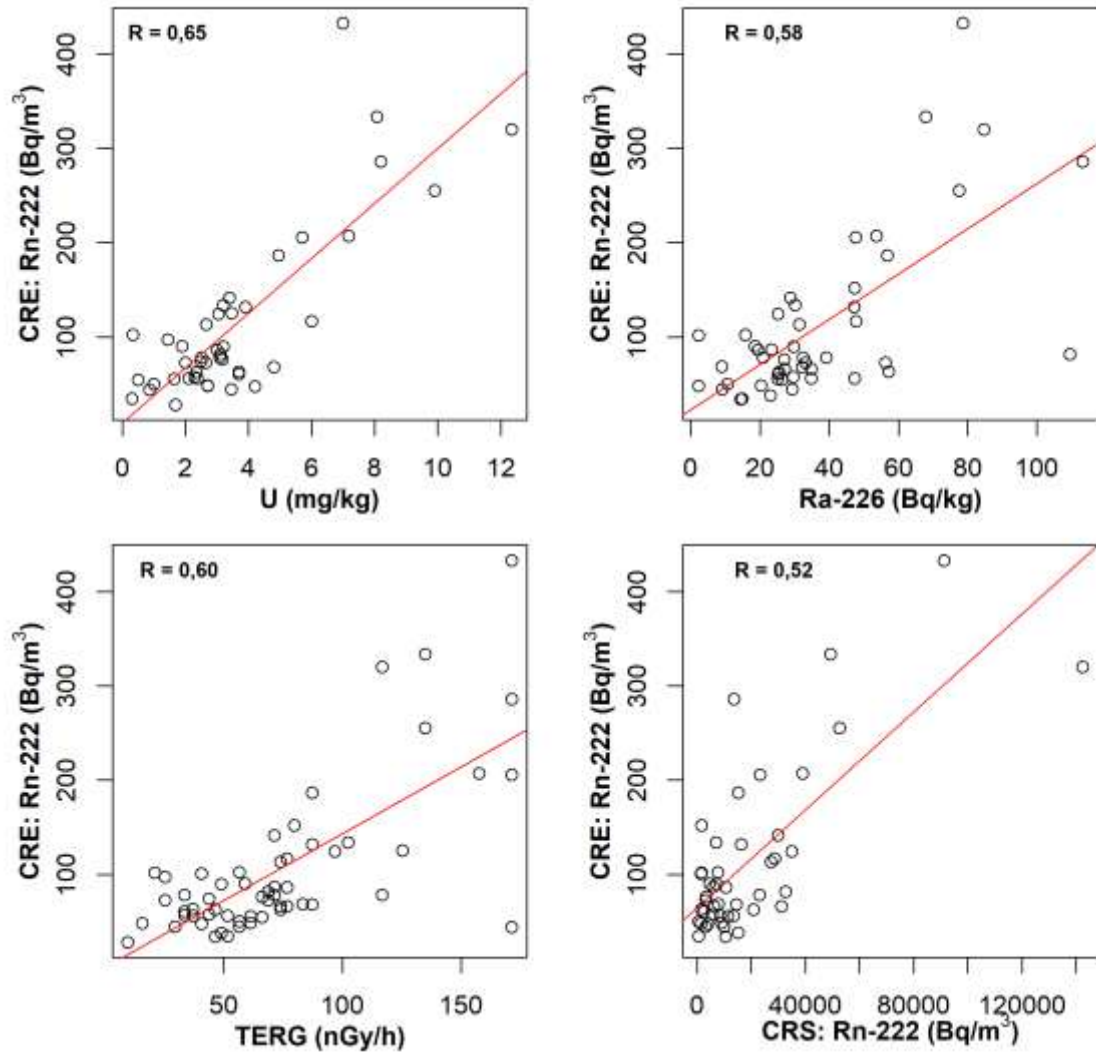


Figura 4.4 – Diagramas de dispersão da mediana por unidade geológica entre a base de dados de concentração de radão em edifícios (CRE, em Bq/m³) e as bases de dados de U (mg/kg) e Ra-226 (Bq/kg) em amostras de rocha, TERG (nGy/h) e concentração de radão em solos (Bq/m³). É indicado no canto superior esquerdo o resultado do coeficiente de correlação de Spearman (R).

4.2. Distribuição espacial dos valores dos parâmetros radiológicos

Numa primeira fase procedeu-se à análise da estrutura espacial das bases de dados para as quais se dispõe de localização das amostras. A localização das amostras é conhecida de forma exata no caso da base de dados de CRS e da atividade de Ra-226 medida em amostras de rocha e aproximada no caso da base de dados de CRE. Os semivariogramas omnidirecionais são apresentados na Figura 4.5 e revelam a ausência de correlação espacial, caracterizando-se por um efeito de pepita (do inglês “*nugget effect*”) elevado, que indica uma variabilidade significativa das variáveis em apreço a pequena escala.

Dada a ausência de estrutura espacial das variáveis em causa, procedeu-se numa segunda fase à análise da distribuição espacial dos resultados. A distribuição das medições efetuadas por campanha (2020 e anterior a 2020) encontra-se representada na Figura 4.6. Note-se que no seu conjunto as campanhas permitem obter uma cobertura praticamente total do território nacional. A distribuição geográfica dos valores da concentração de radão apurados por edifício é apresentada na Figura 4.7 e em solos na Figura 4.8. A atividade de Ra-226 medida em amostras de rocha é apresentada na Figura 4.9, a mediana da atividade Ra-226 na Figura 4.10, a mediana da concentração de U por unidade geológica na Figura 4.11 e a TERG na Figura 4.12.

Salienta-se a ocorrência dos valores mais elevados de radão em edifícios nas regiões Norte e Centro, podendo localmente atingir valores dez vezes superiores ao NR estabelecido no Decreto-Lei n.º 108 de 3 de dezembro 2018 (Figura 4.7). A concentração de atividade de radão nos solos mostra um padrão similar à concentração de radão em edifícios, caracterizado também por uma maior frequência de valores elevados nas regiões Norte e Centro (Figura 4.8). Neste último caso, note-se que os dados disponíveis se encontram localizados maioritariamente no Maciço Ibérico, não permitindo obter uma cobertura total do território nacional. Os valores medianos da concentração de U e concentração de atividade de Ra-226, e de TERG mais elevados são também observados em unidades aflorantes nas mesmas regiões do território continental (Figura 4.9 a Figura 4.12).

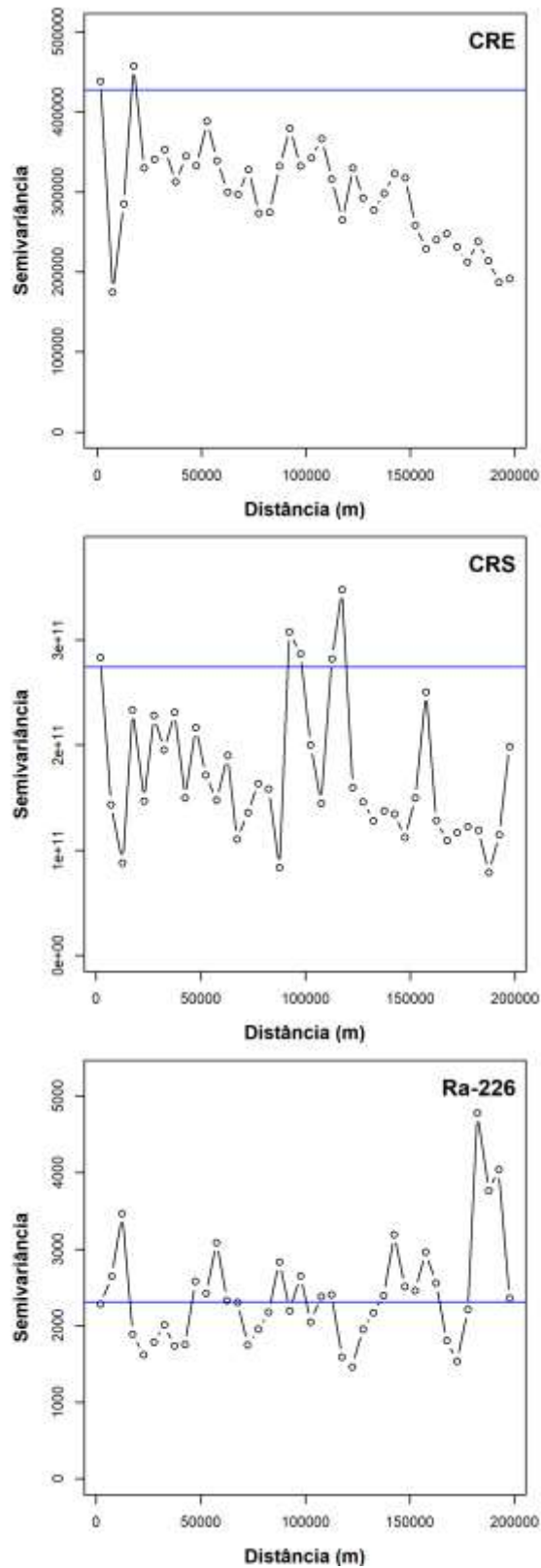


Figura 4.5 – Semivariogramas da atividade de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), e da atividade de Ra-226 medida em amostras de rocha. A linha a azul indica a estimativa do efeito de pepita.

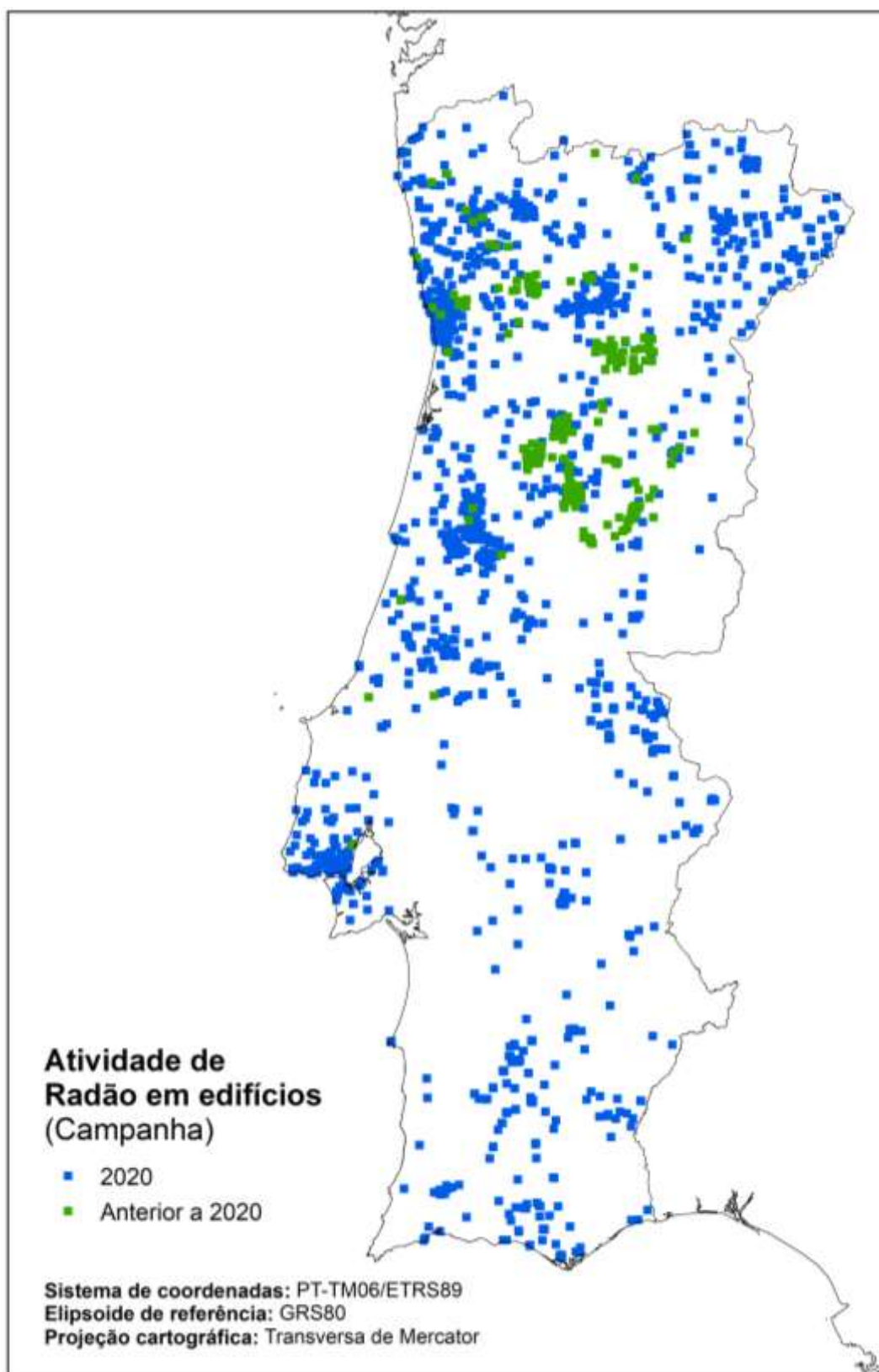


Figura 4.6 – Distribuição espacial dos locais onde foram efetuadas medições da concentração de atividade de radão no interior de edifícios, efetuadas durante 2020 e em períodos anteriores.

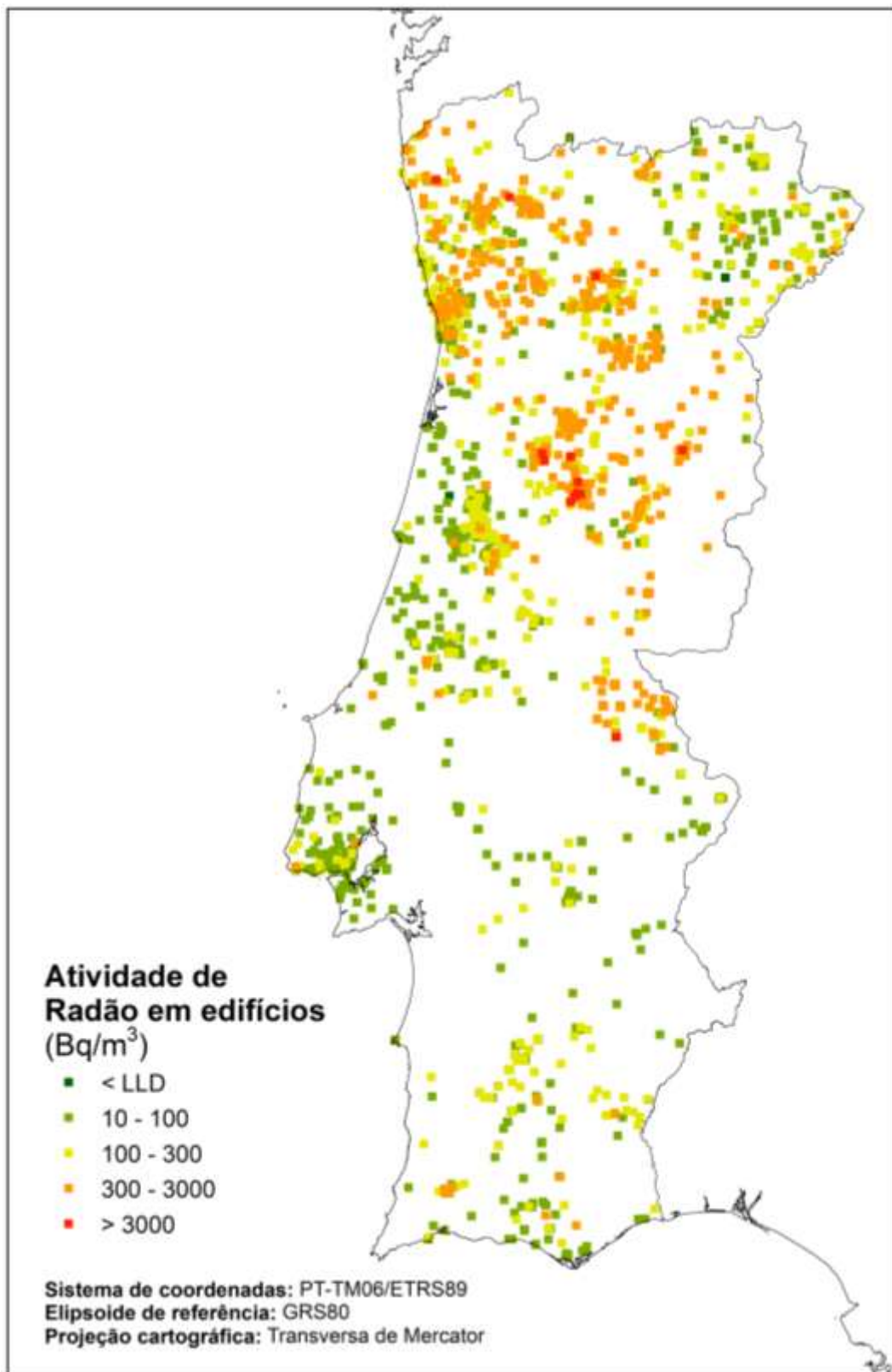


Figura 4.7 – Distribuição espacial da concentração de atividade de radão no interior de edifícios (em Bq/m³). LLD corresponde ao limite de deteção inferior.

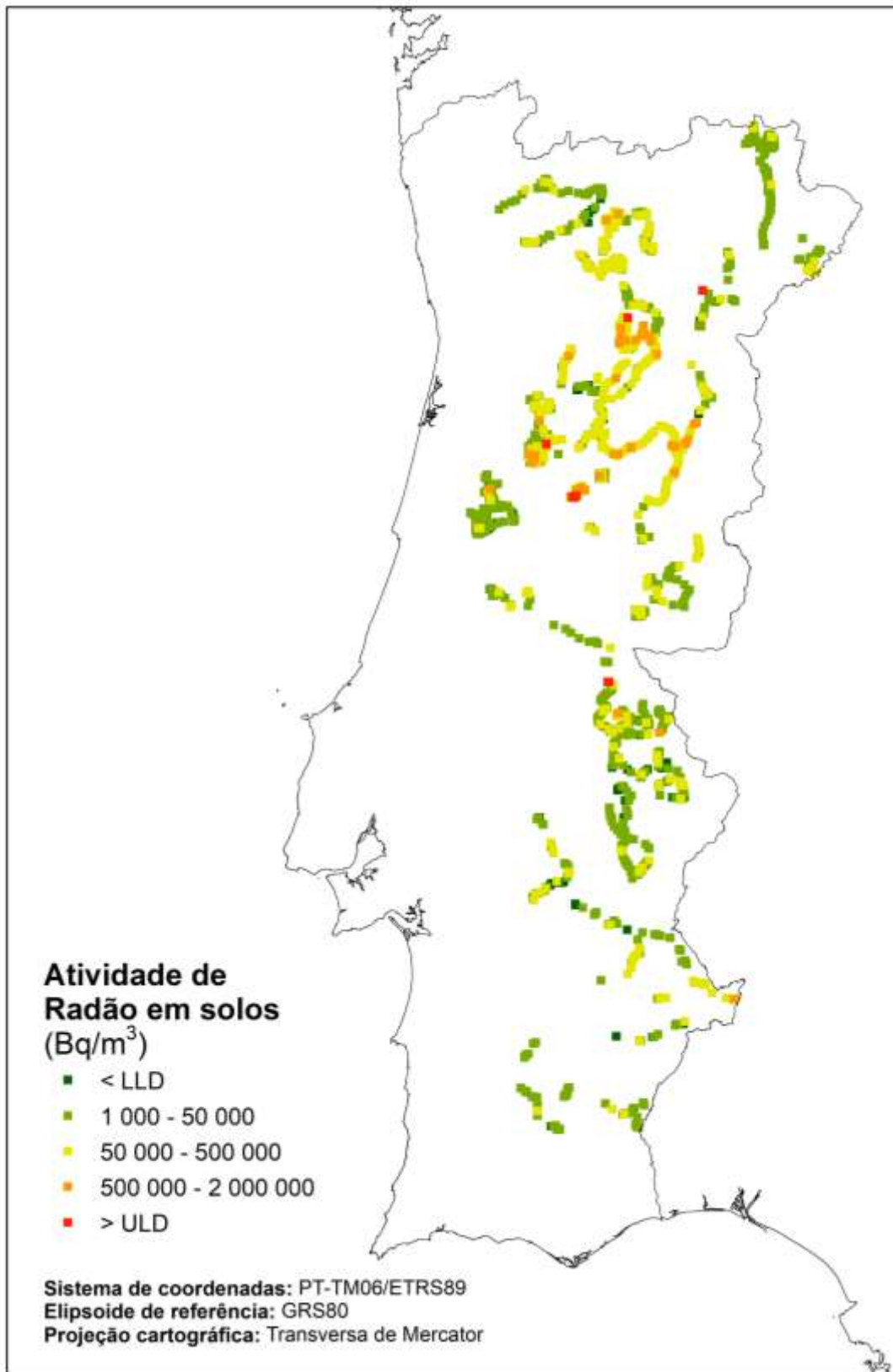


Figura 4.8 – Distribuição espacial da concentração de atividade de radão em solos (em Bq/m³). LLD corresponde ao limite de deteção inferior (de 1 000 Bq/m³) e ULD ao limite de deteção superior (de 2 000 000 Bq/m³).

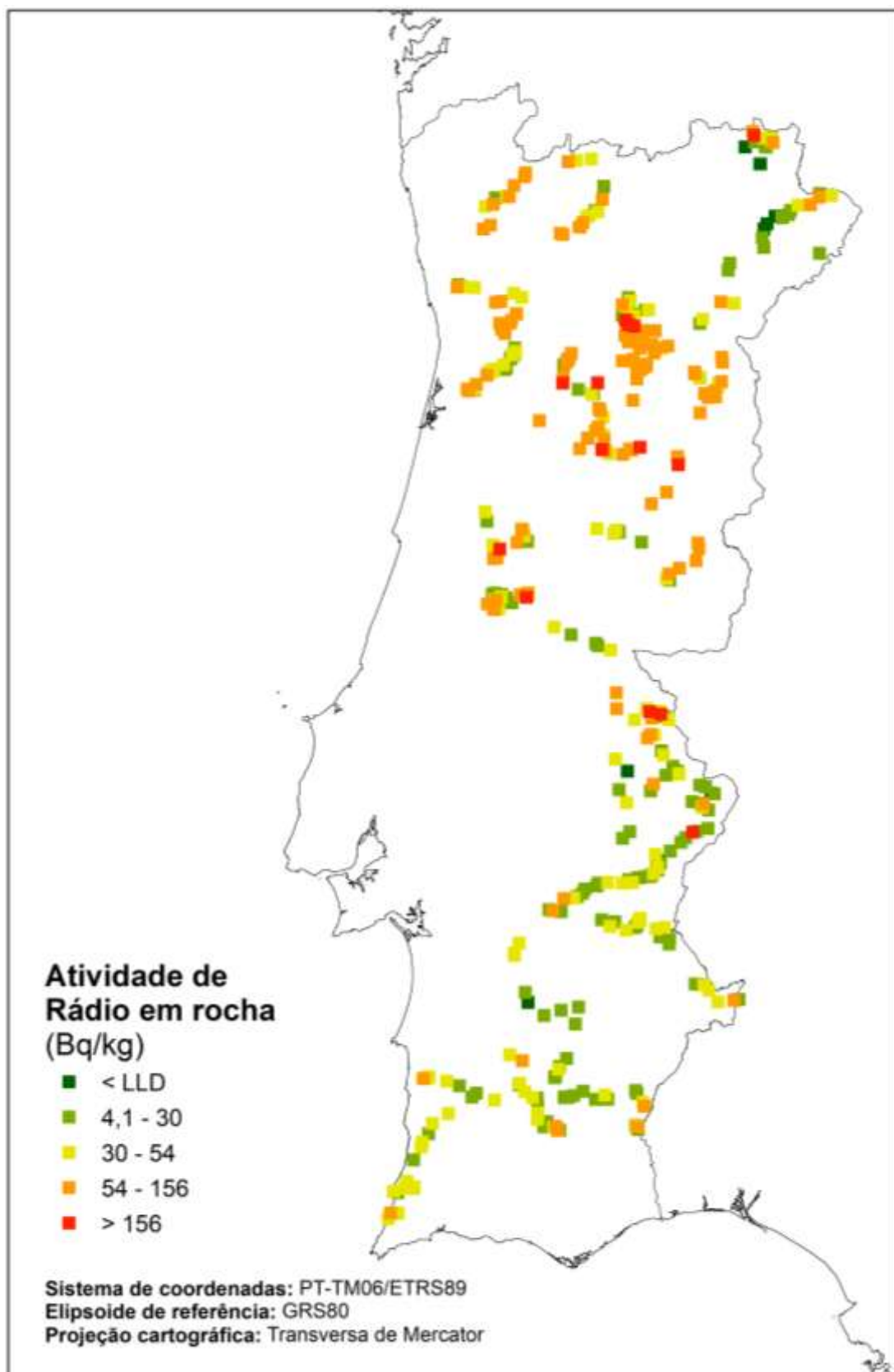


Figura 4.9 – Distribuição espacial da concentração de atividade de Ra-226 (Bq/kg). LLD corresponde ao limite de deteção inferior (de 4,1 Bq/kg).

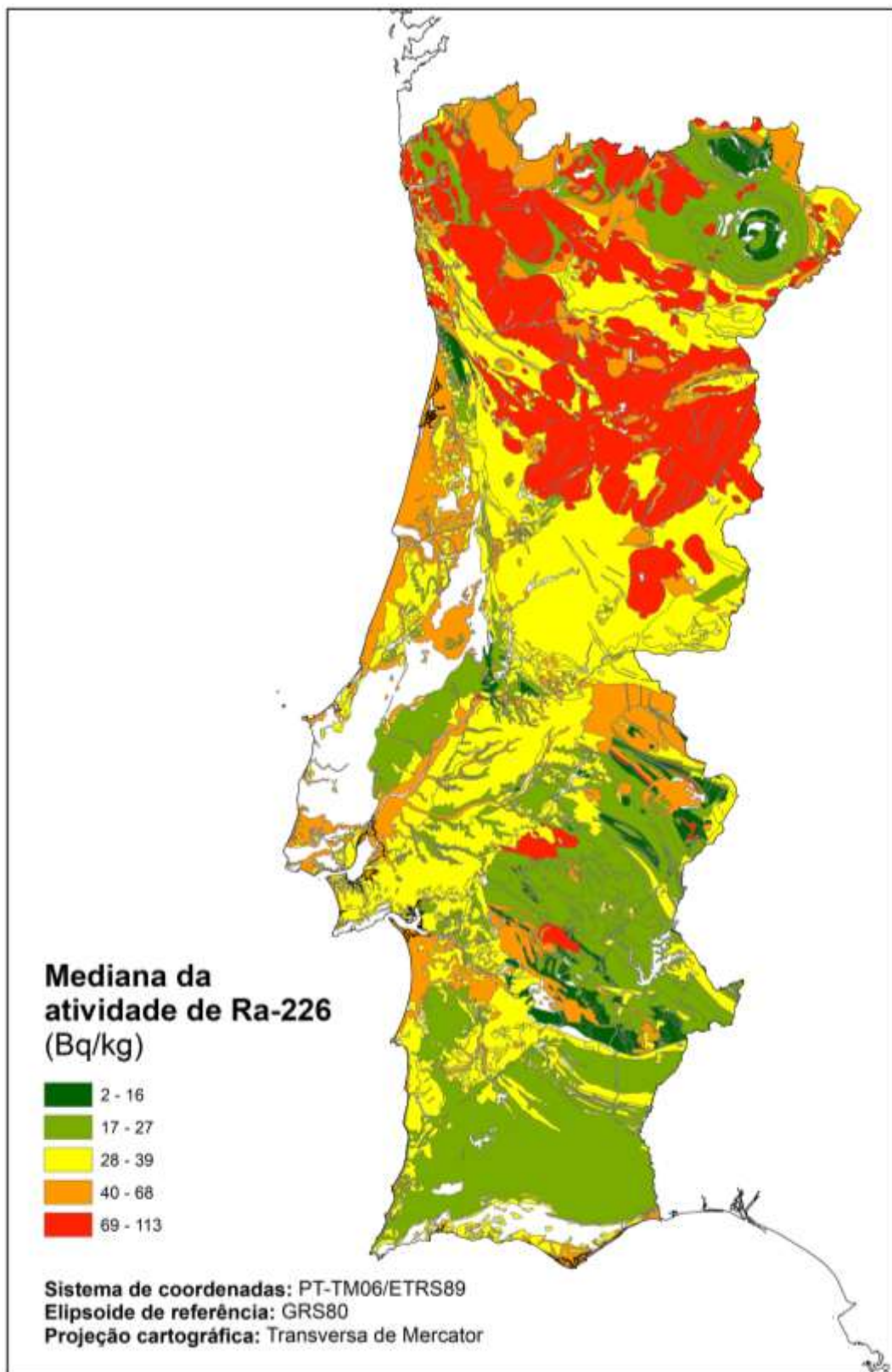


Figura 4.10 – Distribuição espacial da mediana da concentração de atividade de Ra-226 (Bq/kg) por unidade geológica no território nacional. Em branco, áreas sem informação disponível.

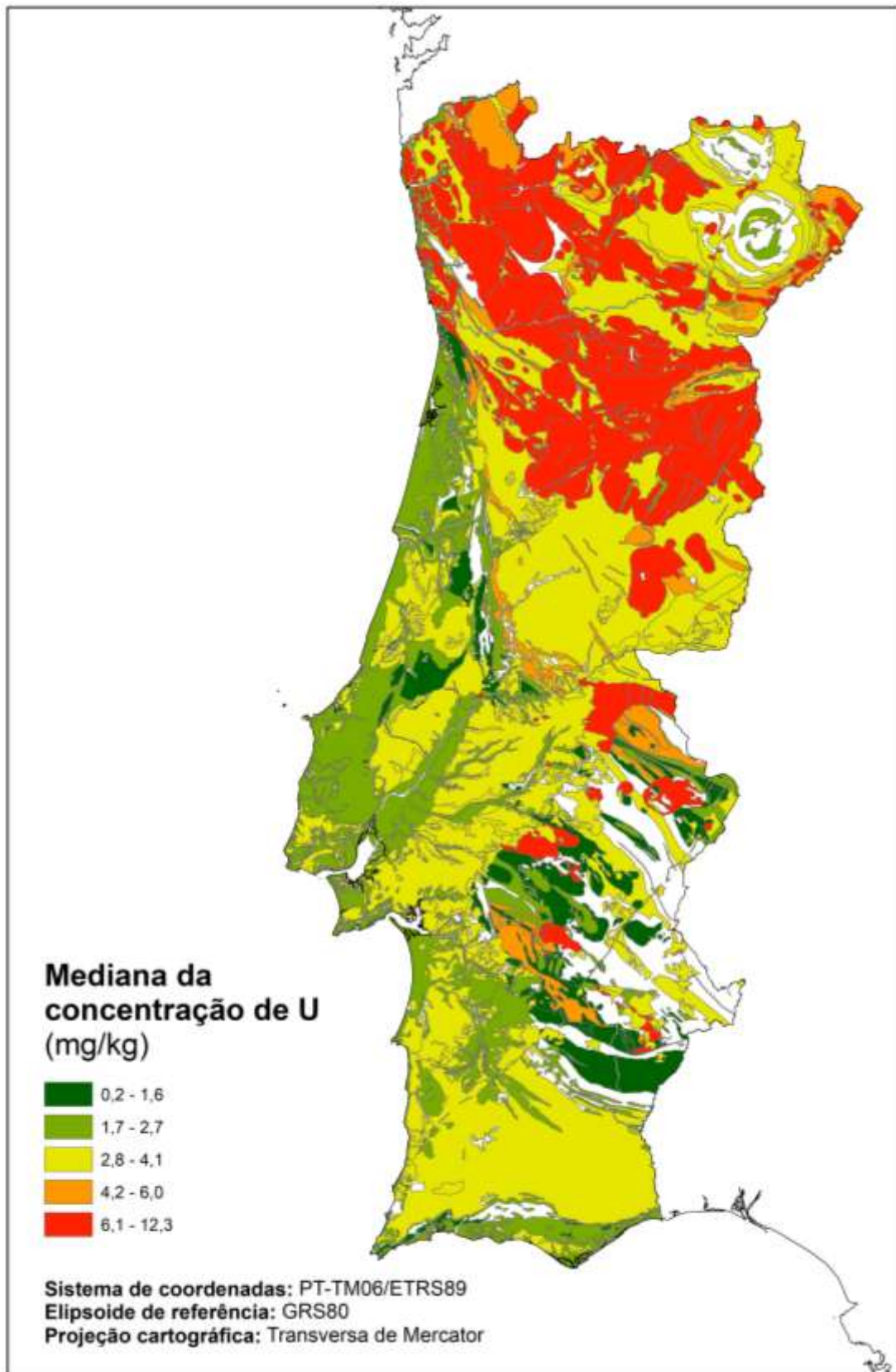


Figura 4.11 – Distribuição espacial da mediana da concentração de U (mg/kg) por unidade geológica no território nacional. Em branco, áreas sem informação disponível.

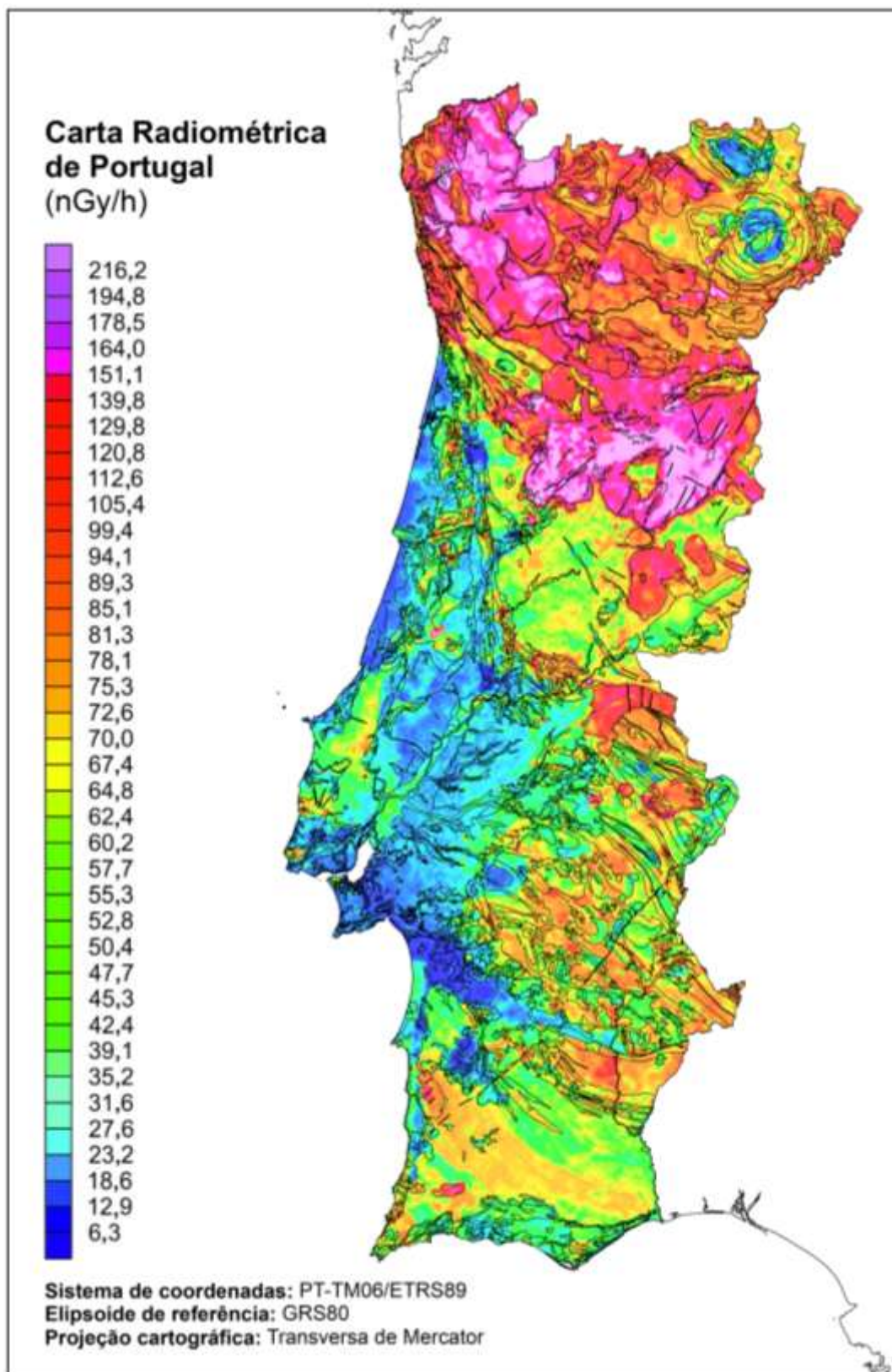


Figura 4.12 – Distribuição espacial da TERG (nGy/h) adaptada de Batista *et al.*, (2013), à qual se encontra sobreposta a Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010).

4.3. Caracterização das unidades geológicas com base nos dados disponíveis

É apresentada uma descrição estatística sumária dos valores obtidos por unidade geológica para a concentração de atividade de radão em edifícios na Tabela 4.2, para a concentração de atividade de radão em solos na Tabela 4.3, para a concentração de U na Tabela 4.4 e para a concentração de atividade de Ra-226 na Tabela 4.5. Note-se, no caso das medições da concentração de atividade de radão no interior de edifícios, que a mediana das unidades g3, g2_a e g2_b (granitos biotíticos, granitos de duas micas e granitos biotíticos com plagioclase cálcica, respetivamente) é superior ao NR estabelecido no Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis de concentração de atividade de radão em edifícios (em Bq/m³) por unidade geológica. N – Número de amostras; % N > NR representa a percentagem de medições efetuadas com resultado superior ao nível de referência (NR) de 300 Bq/m³; (*) Mediana superior ao valor de referência; nd – não determinado.

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	% N > NR
Q1	87	93	130	6	36	56	96	998	3
Q2	107	382	689	6	42	73	289	3 405	23
N2	52	84	281	13	30	44	56	2 067	2
N1m	61	158	157	11	29	78	293	507	25
N1c	18	91	93	11	43	61	100	426	6
E	38	176	370	21	43	90	135	1 784	5
CVL	21	36	23	12	18	28	43	92	0
K2	85	87	102	6	41	56	95	841	2
K1-2	64	84	73	6	34	63	104	414	3
K1	23	117	155	27	49	74	117	782	4
J3	40	287	456	15	42	63	172	1 400	20
J2	14	224	326	40	75	97	190	1 293	21
J1	45	74	83	6	30	48	89	495	2
TJ1	60	74	79	11	37	58	77	574	2
C1_a	1	69	nd	69	69	69	69	69	0
C1-2	88	99	74	6	48	76	130	454	2
D3C1	77	87	65	6	45	73	111	354	1
D2-3_a	3	75	61	25	41	57	100	143	0
D2-3f	10	102	44	43	65	114	136	154	0
D1f_a	5	339	536	41	51	78	239	1 288	20
D1_b	8	72	30	39	46	66	94	120	0
D1_a	7	181	91	121	134	152	172	380	14
SDof	21	72	120	15	27	48	67	587	5
SA	45	274	540	12	56	87	142	2 470	16
SDP	6	280	290	71	88	132	394	788	33
SD1	8	68	26	29	52	66	90	102	0
S	11	183	232	36	56	134	192	848	9
DA	16	106	62	22	59	101	131	275	0

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	% N > NR
OA	25	158	169	28	51	86	171	580	16
ODP	62	250	317	34	67	124	296	1 744	24
OD1	1	45	nd	45	45	45	45	45	0
O_b	1	63	nd	63	63	63	63	63	0
O_a	60	125	160	12	38	68	134	749	10
ep1	2	90	7	85	88	90	93	95	0
ep1c	4	50	17	34	37	50	63	66	0
ep2	1	78	nd	78	78	78	78	78	0
NPep	392	220	293	6	76	142	236	2 932	18
epL	3	47	22	31	35	38	55	72	0
NPA1	16	95	61	6	41	102	127	215	0
NPA2	1	34	nd	34	34	34	34	34	0
NP2	37	92	120	16	35	49	111	671	5
NP1	21	137	113	12	76	102	165	471	14
f2	1	44	nd	44	44	44	44	44	0
sigma2	26	190	171	27	91	125	206	646	19
f1	11	76	60	20	41	55	85	232	0
qz	3	241	84	144	215	286	289	292	0
pi	2	117	91	52	85	117	149	181	0
GAMA	18	42	34	6	18	34	54	131	0
sigma	4	75	31	33	63	82	94	104	0
g3*	139	520	556	23	160	334	649	3 284	54
g2_b*	806	662	752	6	194	433	838	7 003	62
g2_a*	9	421	299	195	214	320	535	1 138	56
g1_b	127	337	387	12	132	207	388	2 995	35
g1_a	217	379	474	14	113	255	466	3 388	43
g1a	28	66	45	23	44	56	70	251	0
g	13	311	439	23	105	205	309	1 712	31
gz	33	291	447	26	96	186	279	2 597	18

Tabela 4.3 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis da concentração de atividade de radão em solos (em Bq/m³) por unidade geológica. N – Número de amostras; nd – não determinado.

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
Q1	86	16 971	16 105	550	6 160	13 507	21 670	84 299
N2	31	15 414	14 668	550	5 632	9 989	19 913	57 511
N1c	8	3 869	3 976	550	1 762	2 464	3 723	12 685
E	8	6 892	5 303	550	1 726	7 221	11 135	13 984
K2	6	11 558	9 499	2 543	4 323	8 582	17 956	25 657
K1-2	1	1 679	nd	1 679	1 679	1 679	1 679	1 679
J1	7	3 585	2 360	550	1 886	4 108	4 631	7 404
TJ1	75	6 643	5 942	550	2 807	5 550	7 495	36 730
C2	19	10 424	11 694	550	1 346	7 721	14 669	46 994
C1_a	3	9 651	5 749	5 027	6 433	7 839	11 963	16 088
C1-2	24	7 466	9 753	550	1 244	3 405	9 141	33 044
D3C1	93	10 090	16 294	550	550	3 247	12 472	112 394
D2-3f	4	23 742	17 353	550	15 855	27 251	35 139	39 917
D2-3	22	10 019	11 897	1 680	3 679	6 324	10 375	49 710

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
D1f_b	13	78 880	101 450	3847	21539	32427	55852	281177
D1_b	8	11 617	13 607	550	3722	6291	13963	39593
D1_a	11	10 811	15 567	550	1363	1645	17142	50749
SDof_a	1	1 344	nd	1 344	1 344	1 344	1 344	1 344
SDof	3	7 112	9 990	1 344	1 344	1 344	9 996	18 648
SA	29	12 845	16 228	550	1 680	5 914	15 734	60 795
SDP	37	27 021	36 072	550	4 704	16 257	33 600	188 852
SD1	31	85 252	135 240	550	5 788	31 114	108 455	659 664
S	44	23 676	67 335	550	2 078	6 963	14 260	430 769
DA	4	1 868	1 434	550	1 146	1 512	2 234	3 898
OA	1	10 727	nd	10 727	10 727	10 727	10 727	10 727
ODP	46	64 898	85 886	550	11 944	34 899	77 428	349 798
OD1	6	3 258	2 597	550	893	3 137	5 512	6 276
O_b	25	40 130	49 206	550	5 111	20 730	58 183	178 992
O_a	117	51 834	87 393	550	3 942	14 599	52 479	502 176
ep1	7	5 051	4 476	550	1 221	4 521	7 656	12 531
ep1c	23	3 693	5 197	550	550	550	4 833	18 040
ep2	31	66 131	101 111	550	6 196	23 076	93 296	499 385
NPep	435	275 230	683 338	550	9 179	29 968	153 016	3 400 000
epL	4	14 080	6 332	5 376	12 311	15 225	16 994	20 496
NPA1	11	4 024	5 431	1 680	1 680	1 680	3 200	19 824
NPA2	17	13 175	12 228	1 680	4 939	10 450	16 939	41 235
NPL	3	6 896	3 250	3 226	5 640	8 054	8 731	9 408
NP2	57	30 885	58 599	550	1 751	8 947	23 117	244 285
NP1	8	10 537	10 420	550	2 508	7 758	14 674	27 866
qz	5	58 664	76 402	1 816	1 816	13 622	104 432	171 632
pi	7	65 941	75 390	550	1 254	28 662	130 314	169 236
GAMA	8	4 343	6 359	550	550	550	5 627	17 526
GAMAz	11	8 019	10 710	550	1 580	4 114	7 589	33 167
sigma	12	35 070	32 344	550	4 601	32 603	51 448	100 800
gap	1	3 886	nd	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886
g3	147	89 959	118 822	550	15 461	49 197	102 644	699 740
g2_b	738	263 655	523 070	550	35 978	91 258	236 359	3 400 000
g2_a	56	285 369	482 938	550	83 590	142 374	305 523	3 400 000
g1_b	89	75 426	98 395	550	17 254	39 049	81 870	497 643
g1_a	215	109 244	205 489	550	22 223	52 685	107 843	1662977
g1a	33	17 853	19 191	550	3 583	11 352	26 403	73 544
g	15	49 337	67 640	1 552	10 208	23 184	51 870	245 817
gz	95	40 858	73 112	550	5 421	15 268	41 674	529 665

Tabela 4.4 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis de concentração de U (em mg/kg) por unidade geológica. N – Número de amostras; nd – não determinado.

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
Q1	34	2,8	2,0	0,7	1,5	2,1	3,5	8,7
Q2	65	3,0	1,8	0,6	2,2	2,7	3,8	9,2
N2	51	4,3	3,4	1,6	2,8	3,5	4,2	24,1
N1m	21	3,2	2,2	1,3	1,9	2,5	2,9	9,2
N1c	73	5,4	4,9	0,2	2,8	3,7	5,6	29,8
E	45	4,2	2,9	1,5	2,3	3,2	5,5	15,0

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
CVL	76	2,0	1,3	0,4	1,2	1,7	2,4	5,6
K2	43	2,5	1,6	0,5	1,1	2,4	3,4	6,9
K1-2	45	4,4	2,2	2,1	3,0	3,7	5,1	12,4
K1	112	3,0	1,7	1,1	2,0	2,5	3,3	8,9
J3	12	3,5	2,8	1,4	2,0	2,3	3,5	11,0
J2	15	1,4	0,2	0,9	1,1	1,5	1,5	1,7
J1	26	4,9	3,0	0,7	3,2	4,2	6,6	10,9
TJ1	112	2,4	1,0	0,7	1,8	2,3	3,0	5,6
C2	27	5,2	1,9	1,7	4,5	5,3	5,8	10,4
C1-2	139	3,3	1,8	1,1	2,3	3,2	3,8	14,1
D3C1	286	2,5	2,1	0,1	1,0	2,0	3,2	13,7
D2C1	10	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,5	1,0
D2-3f	2	2,7	0,0	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
D2-3	82	2,7	0,9	0,9	2,2	2,7	3,1	6,9
SDof_a	16	1,1	0,6	0,1	0,8	1,1	1,2	2,0
SDof	48	2,8	1,3	0,1	2,1	2,7	3,1	10,5
SDP	57	4,1	1,5	0,5	3,0	3,9	5,1	7,9
SD	33	1,9	1,9	0,1	0,1	1,6	3,0	7,6
S	9	3,2	0,5	2,6	2,9	3,2	3,5	4,0
OA	1	3,0	nd	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
ODP	109	3,6	2,8	0,5	2,4	3,1	4,2	22,4
O_a	17	5,4	4,5	0,8	3,1	4,8	6,4	20,8
ep1	4	1,9	0,7	1,2	1,4	1,9	2,4	2,5
ep1c	11	1,8	2,9	0,3	0,6	1,0	1,6	10,3
ep2	5	3,5	1,7	1,3	2,7	3,1	5,1	5,3
NPep	404	3,5	1,5	0,1	2,9	3,4	3,8	13,9
NP2	49	2,9	2,8	0,0	1,2	2,7	3,7	18,1
NP1	121	1,0	1,2	0,0	0,2	0,3	1,1	4,7
f2	38	3,1	6,3	0,1	0,5	0,9	1,8	33,2
sigma2	12	3,6	2,7	1,0	1,3	3,5	4,7	8,8
f1	26	0,6	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1
f	2	12,0	2,8	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
qz	16	8,5	3,1	3,2	6,4	8,2	9,9	16,4
pi	13	5,4	2,7	1,7	3,2	6,0	6,3	10,0
GAMA	157	1,0	1,8	0,0	0,1	0,3	1,0	11,3
GAMA1	9	2,7	1,6	0,7	1,6	2,5	2,7	5,4
GAMA2	18	2,5	1,4	0,0	1,9	2,3	3,0	6,7
GAMAz	11	0,5	0,6	0,1	0,2	0,2	0,5	2,2
sigma1	5	5,1	0,9	4,3	4,6	4,7	5,5	6,6
O_c	9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
sigma	16	3,9	3,6	0,9	1,6	3,1	3,7	15,8
gap	13	20,3	19,0	4,5	9,1	12,1	18,5	57,8
g4	9	2,9	2,4	0,7	1,0	1,7	4,4	6,8
g3	121	9,4	5,1	2,4	5,8	8,1	12,0	29,0
g2_b	377	8,3	5,4	0,1	5,0	7,0	10,7	33,2
g2_a	30	15,6	11,1	0,5	7,5	12,4	24,7	41,3
g1_b	21	8,4	5,1	2,0	6,0	7,2	8,0	22,5
g1_a	318	10,2	5,4	0,3	6,0	9,9	13,7	43,7
g1a	63	2,9	4,0	0,6	1,1	1,6	3,7	30,5
g	33	6,2	3,1	1,5	4,0	5,7	6,8	17,0
gz	38	4,8	3,0	0,5	2,6	5,0	5,0	14,0

Tabela 4.5 – Estatística descritiva sumária dos dados disponíveis da concentração de atividade de Ra-226 (em Bq/kg) em edifícios por unidade geológica. N – Número de amostras; nd – não determinado.

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
Q1	1	35	nd	35	35	35	35	35
Q2	1	56	nd	56	56	56	56	56
N2	5	31	8	22	25	29	34	43
N1m	1	32	nd	32	32	32	32	32
N1c	3	28	7	23	24	25	31	37
E	19	26	11	7	18	30	33	45
K2	10	60	40	20	39	47	63	165
K1-2	3	62	16	49	53	57	68	80
TJ1	2	30	19	16	23	30	36	43
C2	2	35	10	29	32	35	39	42
C1_b	7	29	7	17	25	29	34	38
C1_a	1	9	nd	9	9	9	9	9
C1-2	31	30	12	8	22	27	35	69
D3C1	70	40	31	5	21	33	43	156
D2-3f	3	32	4	29	30	31	34	37
D2-3	12	28	15	9	20	27	31	70
D1f_b	11	28	7	14	25	29	33	36
D1f_a	4	38	6	31	35	39	43	43
D1_b	2	35	17	23	29	35	41	47
D1_a	3	36	22	11	29	47	49	50
SDof_a	1	2	nd	2	2	2	2	2
SDof	2	2	0	2	2	2	2	2
SA	12	32	31	7	14	23	30	107
SDP	10	73	78	17	29	47	84	278
SD1	15	27	14	2	19	27	34	60
SD	2	25	5	21	23	25	27	29
S	9	97	186	10	19	30	47	588
OA	2	19	2	18	19	19	20	21
ODP	2	25	9	19	22	25	28	32
OD1	5	17	13	6	8	9	29	34
O_b	9	28	9	16	20	25	32	43
O_a	31	36	26	2	22	32	39	159
ep1	4	19	7	12	14	19	24	26
ep1c	4	11	8	2	8	11	13	21
ep2	6	26	14	12	17	21	35	47
NPep	56	31	16	6	21	29	39	87
epL	1	23	nd	23	23	23	23	23
NPA1	3	2	0	2	2	2	2	2
NPA2	4	15	8	8	8	14	21	22
NPL	1	9	nd	9	9	9	9	9
NP2	11	25	14	9	17	20	30	60
NP1	4	17	5	14	14	16	19	24
f1	2	26	4	23	25	26	28	29
qz	1	113	nd	113	113	113	113	113
pi	5	38	18	10	30	48	48	52
GAMA	11	25	27	2	9	15	31	90
GAMAz	4	17	24	2	5	7	19	53
sigma	4	142	139	31	31	109	220	319

	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
g3	15	66	35	21	35	68	79	138
g2_b	60	85	40	29	58	79	101	189
g2_a	19	123	116	52	76	85	113	577
g1_b	10	55	28	10	43	54	74	97
g1_a	31	82	27	42	66	78	94	151
g1a	23	30	16	13	20	25	34	83
g	3	51	23	29	39	48	61	75
gz	29	59	36	11	37	57	70	165

Na Tabela 4.6 é apresentada o número de amostras por 100 km² da unidade geológica para cada base de dados. Os dados revelam uma densidade de amostragem heterogénea e geralmente baixa, verificando-se frequentemente uma densidade de amostragem inferior a uma amostra por 100 km². Note-se ainda que as bases de dados são regra geral incompletas, não dispondo de informação para várias unidades geológicas. Apenas na base de dados de TERG se dispõe de informação para todas as unidades geológicas.

Tabela 4.6 – Densidade de amostragem (número de amostras por 100 km²) por unidade geológica para as bases de dados de concentração de radão em edifícios (CRE) e em solos (CRS), concentração de U (mg/kg) e atividade de Ra-226 (Bq/kg) medidas em rocha. sd – sem dados.

Unidade geológica	Área (km ²)	Número de amostras por 100 km ²			
		CRE	CRS	U	Ra-226
C1_a	17	6	18	sd	6
C1_b	45	sd	sd	sd	16
C1-2	7 067	1	<1	2	<1
C2	68	sd	28	40	3
CVL	165	13	sd	46	sd
D1_a	153	5	7	sd	2
D1_b	37	22	22	sd	5
D1f_a	227	2	sd	sd	2
D1f_b	319	sd	4	sd	3
D2-3	366	sd	6	22	3
D2-3_a	81	4	sd	sd	sd
D2-3f	489	2	1	<1	1
D2C1	115	sd	sd	9	sd
D3C1	652	12	14	44	11
DA	164	10	2	sd	sd
E	2 897	1	<1	2	1
ep1	267	1	3	1	1
ep1c	425	1	5	3	1
ep2	1 279	<1	2	<1	<1
epL	53	6	7	sd	2
f	20	sd	sd	10	sd
f1	68	16	sd	38	3
f2	48	2	sd	79	sd
g	1 152	1	1	3	<1
g1_a	5 436	4	4	6	1

Unidade geológica	Área (km ²)	Número de amostras por 100 km ²			
		CRE	CRS	U	Ra-226
g1_b	849	15	10	2	1
g1a	1 422	2	2	4	2
g2_a	282	3	20	11	7
g2_b	9 817	8	8	4	1
g3	2 179	6	7	6	1
g4	26	sd	sd	34	sd
GAMA	753	2	1	21	1
GAMA1	25	sd	sd	36	sd
GAMA2	12	sd	sd	146	sd
GAMAz	63	sd	18	18	6
gap	40	sd	3	33	sd
gz	1 022	3	9	4	3
J1	669	7	1	4	sd
J2	1 001	1	sd	1	sd
J3	2 694	1	sd	<1	sd
K1	463	5	sd	24	sd
K1-2	1 200	5	<1	4	<1
K2	437	19	1	10	2
N1c	3 219	1	<1	2	<1
N1m	1261	5	sd	2	<1
N2	6 513	1	<1	1	<1
NP1	494	4	2	24	1
NP2	1 464	3	4	3	1
NPA1	217	7	5	sd	1
NPA2	77	1	22	sd	5
NPep	10 783	4	4	4	1
NPL	40	sd	7	sd	2
O_a	1 768	3	7	1	2
O_b	705	<1	4	sd	1
O_c	28	sd	sd	33	sd
OA	802	3	<1	<1	<1
OD1	426	<1	1	sd	1
ODP	2 265	3	2	5	<1
pi	511	<1	1	3	1
Q1	2 294	4	4	1	<1
Q2	3 990	3	sd	2	<1
qz	122	2	4	13	1
S	438	3	10	2	2
SA	940	5	3	sd	1
SD	921	sd	sd	4	<1
SD1	1 909	<1	2	sd	1
SDof	295	7	1	16	1
SDof_a	48	sd	2	34	2
SDP	889	1	4	6	1
sigma	86	5	14	19	5
sigma1	15	sd	sd	33	sd
sigma2	78	33	sd	15	sd
TJ1	544	11	14	21	<1
v	12	sd	sd	sd	sd

5. AVALIAÇÃO DO RISCO RADIOLÓGICO

5.1. Métodos e critérios na avaliação de risco

Conforme exposto no capítulo 2, têm sido propostos vários métodos com o propósito de avaliar o risco de exposição ao radão. A escolha do método mais adequado depende dos dados disponíveis, devendo ter, como princípio geral, o de maximizar o proveito da informação disponível por forma a obter o modelo que melhor se ajuste ao cenário real. Nos capítulos 3 e 4 procedeu-se à descrição e análise estatística das bases de dados de parâmetros de interesse radiológico e disponíveis para o território continental. Embora coerentes entre si, as bases de dados revelam-se fragmentárias, caracterizando-se na generalidade dos casos por uma baixa densidade de amostragem e cobertura incompleta do território. Como também já atrás foi referido, as bases de dados que integram amostras cuja localização não é conhecida ou é conhecida com alguma incerteza não permitem avaliar a sua estrutura espacial, o que limita a aplicação de métodos geoestatísticos.

Em face das limitações acabadas de referir, optou-se por uma outra estratégia, ou seja, proceder à identificação das áreas onde é esperada uma maior exposição ao radão recorrendo a um método simples de classificação binária, tal como descrito por Bossew (2014). Este autor aplicou essa metodologia à classificação de ZSER, tendo Tharwat (2020), feito uma revisão detalhada dos princípios dos sistemas de classificação e das métricas relevantes. O método em apreço permite classificar uma dada área (neste caso, a área correspondente a uma unidade geológica) como uma ZSER ou não-ZSER com base nos dados disponíveis, que são utilizados como preditores, através de sistemas de classificação binária treinados para cada uma das variáveis independentes (CRS, concentração de U ou atividade de Ra-226 em rocha e TERG). Para efeitos da aplicação do método considerou-se, em acordo com a entidade reguladora em Portugal (APA), como critério para definição de área de elevado risco de exposição ao radão quando é expectável que a CRE seja igual ou superior ao NR de 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios nessa área. Nesta situação, a classificação binária assume o valor de 1. Quando não é esperada uma CRE igual ou superior ao NR de 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios nessa área, a classificação binária assume o valor 0.

O método de classificação binária adotado baseia-se na análise da curva característica de operação do recetor (do inglês “*Receiver Operating Characteristic Curve*”, ROC), que corresponde a uma representação gráfica do desempenho de um sistema de classificação binário. A análise da curva ROC permite avaliar diferentes classificadores binários,

representados por um ponto na curva ROC, com base na sua performance (Fawcett, 2006), de modo a otimizar a relação de custo-benefício entre verdadeiros positivos (VP) e falsos positivos (FP) e a relação entre verdadeiros negativos (VN) e falsos negativos (FN). É utilizada uma matriz de confusão com dimensão 2 x 2 (Tabela 5.1) entre as condições observadas (colunas) em função do critério estabelecido relativamente à concentração de radão em edifícios e as classificações previstas (linhas), com base num limite classificador de uma variável independente (e.g., CRS, concentração de U ou atividade de Ra-226 em rocha).

Tabela 5.1 – Matriz de confusão para registo dos cenários possíveis de um sistema de classificação binário em função do critério definido onde *PE* é a percentagem de edifícios, 1 indica ZSER, 0 indica não-ZSER, *Med* é a mediana e *I** é o limite classificador definido.

		Classificação baseada na concentração de Rn-222 em edifícios (CRE)	
		$PE(CRE \geq 300 \text{ Bq/m}^3) \geq 10\%$	$PE(CRE \geq 300 \text{ Bq/m}^3) < 10\%$
Classificação baseada no preditor	$Med \geq I^*$	1	0
	$Med < I^*$	0	0

		1	0
1	$Med \geq I^*$	Verdadeiro Positivo	Falso Positivo (Erro de Tipo I)
0	$Med < I^*$	Falso Negativo (Erro de Tipo II)	Verdadeiro Negativo

O treino do modelo de classificação é efetuado aumentando de forma sequencial o limite classificador da variável independente e registando a matriz de confusão obtida para cada classificador (Tabela 5.1). Considera-se como verdadeiro positivo (VP) a unidade geológica que é classificada como 1 quer através de CRE (valor acima do critério definido), quer do preditor (valor acima do limite de classificação considerado). Considera-se como verdadeiro negativo (VN) a unidade geológica que é classificada como 0 quer através de CRE (valor abaixo do critério definido), quer do preditor (valor abaixo do limite de classificação considerado). Os falsos positivos (FP) representam a situação em que a unidade geológica é classificada como 1 através do preditor (valor acima do limite de classificação considerado) e como 0 através de CRE (valor abaixo do critério definido), enquanto os falsos negativos (FN) representam a situação em que a unidade geológica é classificada como 0 através do preditor (valor abaixo do limite de classificação considerado) e como 1 através de CRE (valor acima do critério definido).

Para efeitos de aplicação do método, a classificação binária das unidades geológicas calculada para a CRE foi comparada com a classificação binária calculada para cada preditor recorrendo à mediana da CRS, da concentração de U e da concentração de

atividade de Ra-226 em rocha (apresentadas nas Tabelas 4.2 a 4.5), bem como a mediana da TERG por unidade geológica (apresentada em Anexo). Optou-se pela utilização da mediana dado constituir uma medida de tendência central robusta na presença de uma quantidade significativa de valores extremos (ver capítulo 4). Foram utilizados todos os dados disponíveis independentemente da densidade de amostragem (Tabela 4.6), por forma a maximizar o proveito da informação disponível.

A curva ROC corresponde à representação gráfica da taxa de verdadeiros positivos (TVP, também designada por sensibilidade) em função da taxa de falsos positivos (TFP), para cada um dos limites classificadores (I^* , Tabela 5.1) considerados para uma mesma variável. É obtida uma classificação perfeita quando a TVP é igual a 1 e a TFP é igual a 0. Contudo, por diversos fatores (e.g., o facto de não existir uma correlação perfeita entre as variáveis ou a representatividade dos dados não ser adequada à escala de trabalho) o classificador perfeito não é possível. Na melhor situação é obtido um valor ótimo do preditor (VO) que corresponde ao limite classificador que estabelece o melhor compromisso entre a TVP e a TFP, permitindo a melhor diferenciação entre condições positivas e negativas para o critério definido de CRE, e entre os diferentes tipos de erros (falsos positivos e falsos negativos). A projeção de um ponto na diagonal do espaço ROC que passa pela origem indica que a classificação é aleatória. Para além da indicação visual da curva ROC, existem vários parâmetros que podem ser usados como indicadores do VO do preditor tais como o parâmetro Y de Youden, d_{01} , a exatidão, $kappa$ de Cohen e o coeficiente de correlação de Matthews (e.g., Bossew, 2014). No âmbito da elaboração do mapa de risco de radão considerou-se como VO o valor que maximiza o parâmetro Y de Youden por ser aquele que maximiza o coeficiente de correlação de Matthews em todas as bases de dados analisadas comparativamente ao parâmetro d_{01} . Apresentam-se nas Figuras 5.1 a 5.4 as curvas ROC e de otimização para as diferentes bases de dados, que permitem identificar o valor ótimo (VO) para cada preditor.

Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados para a determinação do valor ótimo na curva ROC (VP - Verdadeiros positivos; VN – Verdadeiros negativos; FP – Falsos positivos; FN – Falsos negativos).

Parâmetro	Fórmula	Significado
TVP	$TVP = \frac{VP}{VP + FN}$	Taxa de verdadeiros positivos
TFP	$TFP = \frac{FP}{FP + VN}$	Taxa de falsos positivos
Y	$Y = TVP - TFP$	Quanto mais elevado, mais distante a classificação é de uma classificação aleatória
Coeficiente de correlação de Matthews (Matthews, 1975)	$MCC = \frac{VP \times VN - FP \times FN}{\sqrt{(VP + FP)(VP + FN)(VN + FP)(VN + FN)}}$	Correlação entre a classificação estimada através do preditor e a classificação estimada através de CRE; varia entre -1 e 1; quanto mais perto de 1 maior a correlação positiva entre a classificação do preditor e a de CRE.

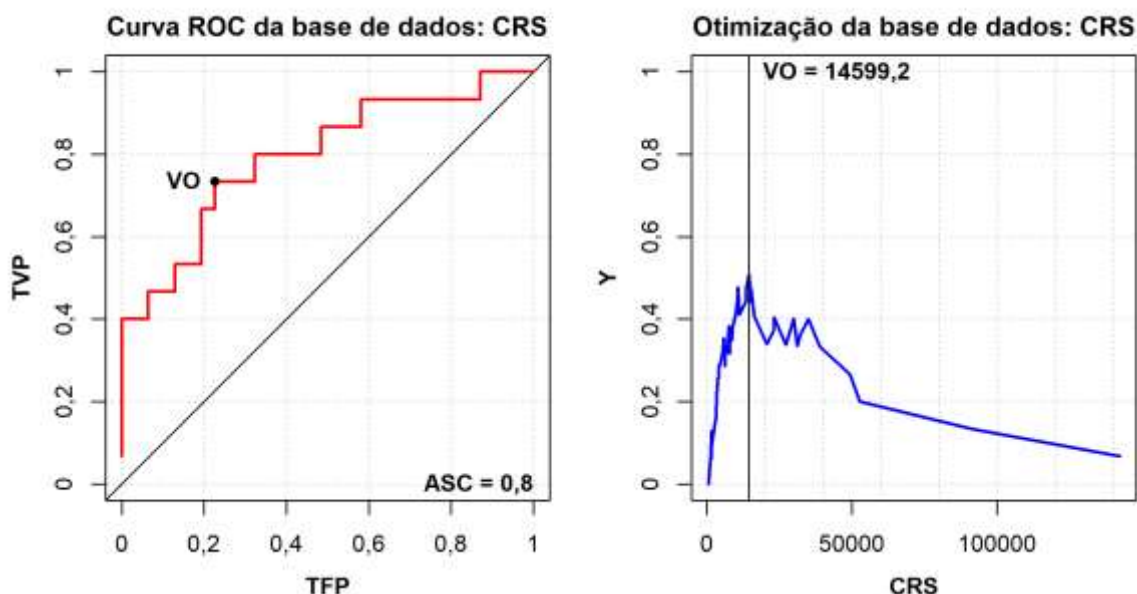


Figura 5.1 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de concentração de radão nos solos (CRS em Bq/m³). O VO é de 14599,2 Bq/m³. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.

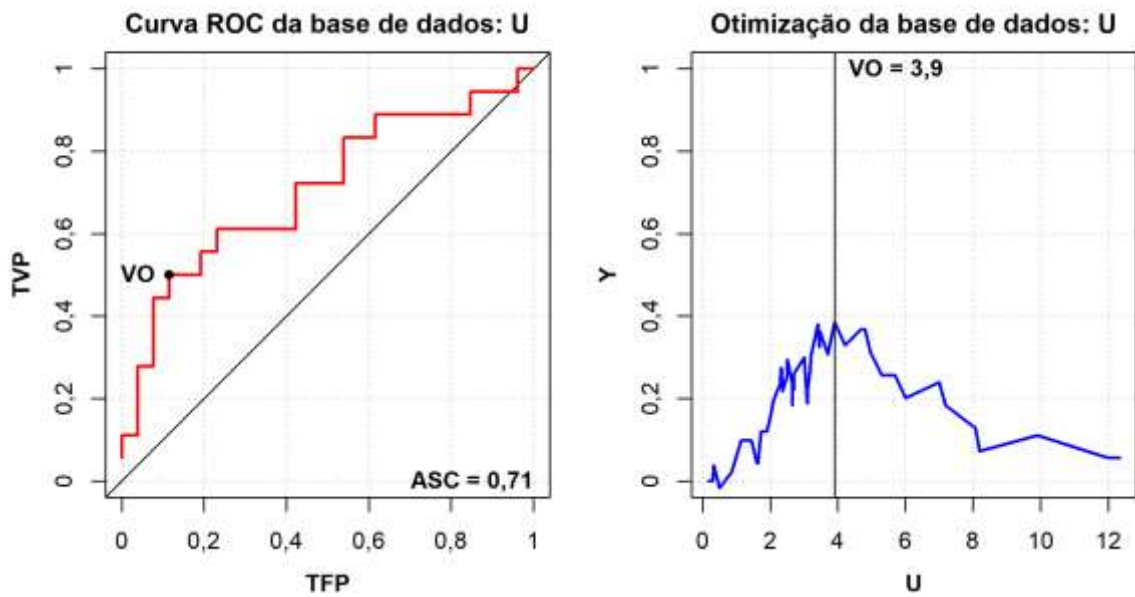


Figura 5.2 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de U em rocha (em mg/kg). O VO é de 3,9 mg/kg. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.

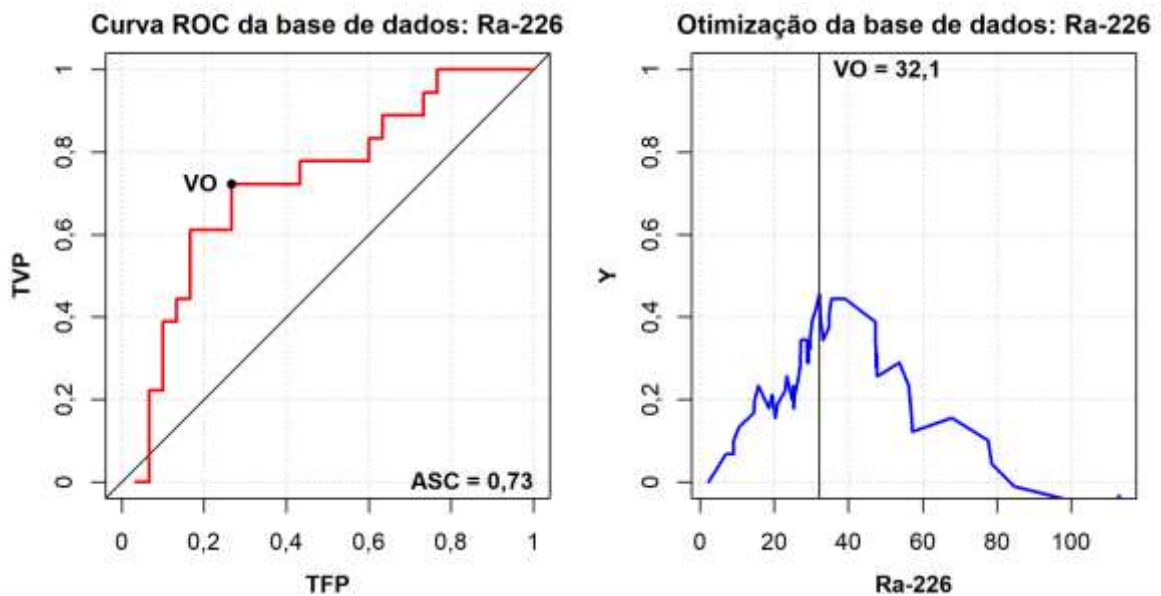


Figura 5.3 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de Ra-226 em rocha (em Bq/kg). O VO é de 32,1 Bq/kg. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.

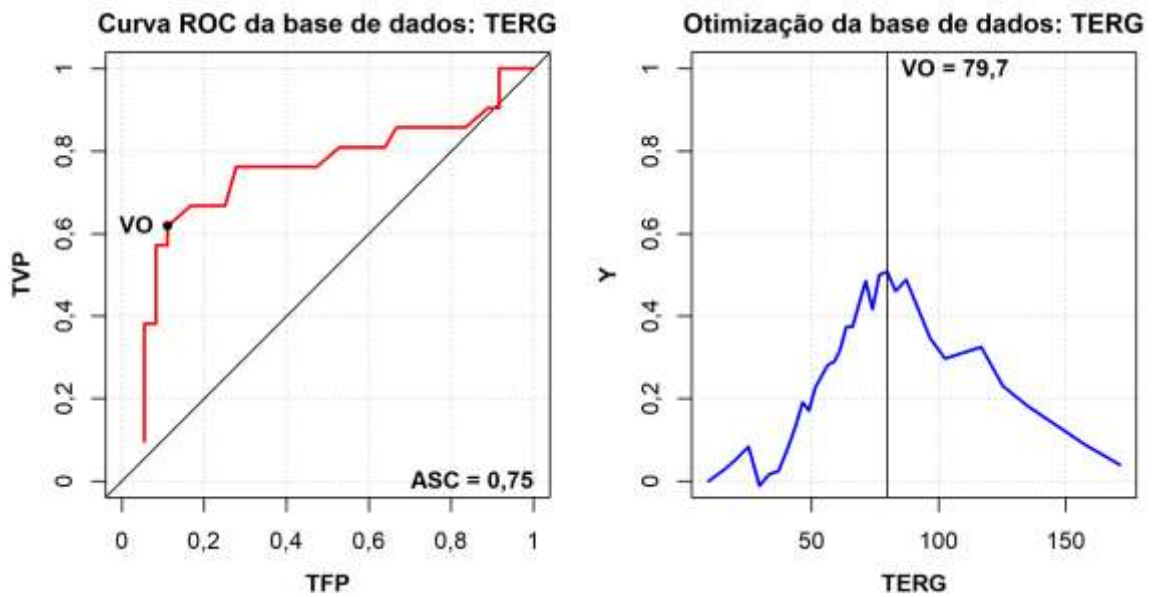


Figura 5.4 – Curva ROC e determinação do VO para a base de dados de TERG (em nGy/h). O VO é de 79,7 nGy/h. É indicada a área sob a curva ROC (ASC) calculada de acordo com o método dos trapézios.

Na Tabela 5.3 apresenta-se a classificação obtida com base na concentração de radão observada no interior dos edifícios (CRE), bem como a classificação estimada com base no valor ótimo (VO) definido para cada um dos parâmetros (Figuras 5.1 a 5.4). Recorde-se que 1 representa a situação em que a concentração de radão em edifícios é igual ou superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios, enquanto o valor 0 representa a situação em que isso não é observado.

Para efeitos de mapeamento do nível de risco, foram considerados três níveis: baixo, médio e elevado. O nível de risco atribuído a cada unidade geológica foi determinado com base no cálculo de um Índice de risco (IR), obtido através de uma média ponderada das classificações binárias atribuídas a cada base de dados considerada. O valor do índice foi calculado com aproximação às milésimas, de acordo com a seguinte equação:

$$IR = \begin{cases} 0,5 \times C_{CRE} + 0,5 \times \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, & \text{na presença de dados de CRE} \\ \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, & \text{na ausência de dados de CRE} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} 0,5 \times C_{CRE} + 0,5 \times \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, & C_{CRE} \neq \phi \wedge n \geq 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, & C_{CRE} = \phi \wedge n \geq 1 \\ C_{CRE}, & C_{CRE} \neq \phi \wedge n = 0 \end{cases}$$

onde C_{CRE} corresponde à classificação binária atribuída de acordo com os valores observados de CRE, e C_i é a classificação binária estimada a partir das variáveis geogénicas i , e n o número de variáveis com informação disponível. Assim, para cada unidade geológica, é calculado o risco suportado na totalidade da informação disponível. O índice de risco varia entre 0 e 1 e será máximo no caso de todas as variáveis com informação disponível convergirem no mesmo ponto, ou seja, observação da concentração de radão na atmosfera interior igual ou superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios.

As unidades geológicas com IR inferior a 0,33 foram classificadas como apresentando baixo risco à presença de radão no ar interior dos edifícios. Unidades com IR compreendido entre 0,33 e 0,67 foram consideradas de risco moderado. Por fim, unidades com IR superior a 0,67 foram classificadas como apresentando elevado risco à presença de radão no ambiente interior dos edifícios.

Tabela 5.3 – Classificação binária por base de dados (1 – é esperada uma concentração de radão em edifícios superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios; 0 – não é esperada uma concentração de radão em edifícios superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios; nd – não determinado por inexistência de dados) e índice de risco por unidade geológica.

Unidade geológica	CRE	CRS	U	Ra-226	TERG	Índice de risco (IR)
D1f_a	1	nd	nd	1	1	1,000
g	1	1	1	1	1	1,000
g1_a	1	1	1	1	1	1,000
g1_b	1	1	1	1	1	1,000
g2_a	1	1	1	1	1	1,000
g2_b	1	1	1	1	1	1,000
g3	1	1	1	1	1	1,000
gz	1	1	1	1	1	1,000
O_a	1	1	1	1	1	1,000
SDP	1	1	1	1	1	1,000
D1_a	1	0	nd	1	1	0,833
ODP	1	1	0	0	1	0,750
sigma2	1	nd	0	nd	1	0,750
gap	nd	0	1	nd	1	0,667
N1m	1	nd	0	1	0	0,667
Q2	1	nd	0	1	0	0,667
NPep	1	1	0	0	0	0,625
C1_b	nd	nd	nd	0	1	0,500
C2	nd	0	1	1	0	0,500
f	nd	nd	1	nd	0	0,500
g4	nd	nd	0	nd	1	0,500

Unidade geológica	CRE	CRS	U	Ra-226	TERG	Índice de risco (IR)
GAMA1	nd	nd	0	nd	1	0,500
J2	1	nd	0	nd	0	0,500
J3	1	nd	0	nd	0	0,500
NP1	1	0	0	0	0	0,500
OA	1	0	0	0	0	0,500
SA	1	0	nd	0	0	0,500
sigma1	nd	nd	1	nd	0	0,500
pi	0	1	1	1	0	0,375
qz	0	0	1	1	1	0,375
D1f_b	nd	1	nd	0	0	0,333
SD	nd	nd	0	0	1	0,333
f2	0	nd	0	nd	1	0,250
sigma	0	1	0	1	0	0,250
C1_a	0	0	nd	0	1	0,167
D1_b	0	0	nd	1	0	0,167
epL	0	1	nd	0	0	0,167
J1	0	0	1	nd	0	0,167
O_b	0	1	nd	0	0	0,167
SD1	0	1	nd	0	0	0,167
D2-3f	0	1	0	0	0	0,125
D3C1	0	0	0	1	0	0,125
ep2	0	1	0	0	0	0,125
K1-2	0	0	0	1	0	0,125
K2	0	0	0	1	0	0,125
Q1	0	0	0	1	0	0,125
S	0	0	0	0	1	0,125
C1-2	0	0	0	0	0	0,000
CVL	0	nd	0	nd	0	0,000
D2-3	nd	0	0	0	0	0,000
D2-3_a	0	nd	nd	nd	0	0,000
D2C1	nd	nd	0	nd	0	0,000
DA	0	0	nd	nd	0	0,000
E	0	0	0	0	0	0,000
ep1	0	0	0	0	0	0,000
ep1c	0	0	0	0	0	0,000
f1	0	nd	0	0	0	0,000
g1a	0	0	0	0	0	0,000
GAMA	0	0	0	0	0	0,000
GAMA2	nd	nd	0	nd	0	0,000
GAMAz	nd	0	0	0	0	0,000
K1	0	nd	0	nd	0	0,000
N1c	0	0	0	0	0	0,000
N2	0	0	0	0	0	0,000
NP2	0	0	0	0	0	0,000

Unidade geológica	CRE	CRS	U	Ra-226	TERG	Índice de risco (IR)
NPA1	0	0	nd	0	0	0,000
NPA2	0	0	nd	0	0	0,000
NPL	nd	0	nd	0	0	0,000
O_c	nd	nd	0	nd	0	0,000
OD1	0	0	nd	0	0	0,000
SDof	0	0	0	0	0	0,000
SDof_a	nd	0	0	0	0	0,000
TJ1	0	0	0	0	0	0,000
v	nd	nd	nd	nd	0	0,000

5.2. Mapa de risco de exposição ao radão na atmosfera interior de edifícios

A caracterização das unidades geológicas por nível de risco é apresentada na Tabela 5.4 e o mapa de risco global de exposição ao radão no interior de edifícios projeta-se na Figura 5.5.

Tabela 5.4 – Classificação das unidades geológicas e respetiva descrição (adaptada de LNEG, 2020) de acordo com o nível de risco estimado com base no índice de risco da Tabela 5.3.

Unidade Geológica	Descrição
Nível de risco: Elevado	
g	Granitos e gnaisses migmatíticos
g1_a	Granitos de duas micas
g1_b	Granitos biotíticos com plagioclase cálcica
g2_a	Granitos de duas micas
g2_b	Granitos biotíticos com plagioclase cálcica
g3	Granitos biotíticos
gz	Ortognaisses, granitos e dioritos deformados
sigma2	Sienitos de Sintra e Sines e sienitos nefelínicos de Monchique
O_a	Quartzitos, filitos, quartzofilitos, metaconglomerados, metacalcários e metavulcanoclastitos
ODP	Quartzitos xistóides e quartzofilitos com intercalações de quartzitos, metachertes e metacalcários
SDP	Filitos e metaquartzovaques com intercalações de quartzitos, metachertes e metacalcários
D1f_a	Filitos e metagrauvaques (<i>flysch</i>)

Unidade Geológica	Descrição
D1_a	Filitos, quartzitos e metacalcários
Nível de risco: Médio	
g4	Granito biotítico de Sintra
gap	Pórfiros graníticos e aplito-pegmatitos
pi	Granófiros, pórfiros e riolitos
sigma1	Metavulcanitos peralcalinos
f	Pórfiros graníticos
qz	Filões de quartzo sigma, ortognaisses graníticos e metassienitos peralcalinos
GAMA1	Dioritos e gabros
f2	Filões básicos
C2	Conglomerados, arenitos, argilitos e carvão
Nível de risco: Médio	
OA	Quartzofilitos, quartzitos e metavulcanitos
C1_b	Filitos, metassilitos e metacalcários
SA	Filitos, xistos quartzo-feldspáticos, xistos verdes, e metavulcanitos
SD	Filitos e quartzitos
D1f_b	Filitos, metagrauvaques e raros metaconglomerados (<i>flysch</i>)
NPeP	Filitos, metagrauvaques, metaquartzovaques, metaconglomerados, metacalcários e xistos (<i>flysch</i>), gnaisses e migmatitos
NP1	Xistos, gnaisses, migmatitos, anfíbolitos, granulitos e eclogitos retrogradados
J2	Calcários, margas e dolomitos
J3	Calcários, margas e arenitos
N1m	Conglomerados, arenitos, biocalcarenitos, siltitos e argilitos
Q2	Areias, cascalheiras, siltes e argilas
Nível de risco: Baixo	
g1a	Tonalitos e granodioritos
sigma	Ortognaisses graníticos e metassienitos peralcalinos
GAMA	Gabros, anortositos e dioritos
GAMA2	Dioritos e gabros de Sintra e Sines
GAMAz	Gabros e peridotitos deformados
O_c	Peridotitos, gabros e basaltos metamorfizados e metarradiolaritos intercalados
NPA1	Metaperidotito
D2-3_a	Anfíbolitos, metaperidotitos e metagabros
v	Xistos verdes, equivalente a D2-3_a (?)
SDof	Anfíbolitos, xistos verdes, metavulcanitos, metagabros retrogradados

Unidade Geológica	Descrição
SDof_a	Serpentinitos, peridotitos e piroxenitos retromorfizados
CVL	Basaltos, piroclastos, microgabros, raros gabros e intercalações sedimentares
D3C1	Metavulcanitos ácidos a básicos e filitos
D2C1	Metavulcanitos ácidos e básicos, metargilitos e metacalcários
f1	Filões básicos
NPA2	Gnaisses quartzofeldspáticos com eclogitos intercalados
NPL	Ortognaisses ocelados com intrusões de basaltos e gabros, metamorfizados
epL	Micaxistos com intrusões de basaltos e gabros, metamorfizados
ep1	Metaconglomerados, filitos, quartzofilitos, metavulcanitos peralcalinos.
O_b	Quartzitos, filitos, quartzofilitos, metaconglomerados, metacalcários e metabasaltos
DA	Metaquartzovaques, quartzofilitos e metavulcanitos básicos
Nível de risco: Baixo	
SD1	Metagrauvaques, quartzitos, metassiltitos, metachertes, filitos, quartzofilitos e metavulcanitos
C1-2	Filitos, metagrauvaques e metaconglomerados (<i>flysch</i>)
C1_a	Filitos e metacalcários
S	Filitos, xistos, metachertes e metacalcários
D2-3f	Filitos, metassiltitos, metaquartzovaques (<i>flysch</i>) e metavulcanitos
D2-3	Filitos, metaquartzovaques, quartzitos e metacalcários
D1_b	Filitos, quartzitos e metacalcários
ep2	Filitos, quartzofilitos e metavulcanitos ácidos e básicos
NP2	Filitos, metagrauvaques, metachertes, metaconglomerados, metacalcários e xistos
OD1	Mármore e metavulcanitos básicos
ep1c	Metacalcários
K1-2	Calcários, arenitos, margas e dolomitos; magmatismo básico
J1	Calcários, margas e dolomitos; magmatismo básico: vulcanitos e filões
K2	Arenitos e argilitos
K1	Arenitos, calcários, margas e dolomitos; magmatismo básico;
TJ1	Arenitos, argilitos e evaporitos com intercalações carbonatadas; magmatismo básico: vulcanitos e filões
E	Arenitos, arcoses, conglomerados, argilitos e siltitos
N2	Arenitos, conglomerados e siltitos
N1c	Arenitos, argilitos, conglomerados e calcários
Q1	Conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos

Como expectável, as rochas graníticas constituem o principal grupo de risco, mas a que se associam algumas litologias metassedimentares paleozóicas, bem como sienitos, dispersando-se maioritariamente nas regiões Norte e Centro (Figura 5.5).

Tomando por base a estimativa de risco para as diferentes unidades geológicas calcularam-se os parâmetros estatísticos relativos à distribuição dos valores obtidos para cada uma das variáveis (geogénicas e do radão no interior das habitações); os resultados obtidos projetam-se na Figura 5.6, sendo as diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes níveis de risco e para cada uma das variáveis em causa.

Nas áreas classificadas com baixo risco, a mediana da concentração de radão no ar interior (58 ± 39 Bq/m³) encontra-se significativamente abaixo tanto do NR nacional como do NR máximo recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) (100 Bq/m³). Apenas 2,4% dos edifícios excedem o NR naquelas áreas, o que corresponde a aproximadamente 1 a cada 40 habitações.

As áreas identificadas com um nível de risco moderado possuem mediana de concentração de radão no ar interior de 116 ± 102 Bq/m³, inferior ao NR estabelecido pela legislação nacional, mas superior ao NR recomendado pela OMS. A percentagem de edifícios nos quais se observam concentrações de radão superiores ao NR é de 18 %, indicando que nestas áreas é expectável que aproximadamente 1 a cada 5 habitações apresente níveis de concentração de radão superiores ao NR.

As áreas reconhecidas com um nível de risco elevado possuem mediana de concentração de radão de 301 ± 300 Bq/m³, superior ao NR recomendado pela Organização Mundial de Saúde e ao NR estabelecido na legislação nacional. A percentagem de habitações que apresentam concentrações de radão superiores ao NR nacional é de 50 %. Tal indica que, nestas áreas, é expectável que aproximadamente 1 a cada 2 casas apresente níveis de concentração de radão superiores ao NR.

Considerando o critério adotado para a identificação das zonas suscetíveis à exposição ao radão, nomeadamente a expectativa de que pelo menos 10% dos edifícios apresentem concentrações de radão no ar interior iguais ou superiores ao NR de 300 Bq/m³, os resultados obtidos permitem classificar as áreas com IR moderado e elevado como ZSER.

A distinção entre dois níveis de risco dentro das ZSER - médio e elevado - é relevante para efeitos de priorização das ações de mitigação, prevenção e gestão territorial. A intervenção nas áreas classificadas com risco elevado, nas quais a mediana das concentrações de radão no ar interior dos edifícios ultrapassa o NR, deve ser considerada prioritária.

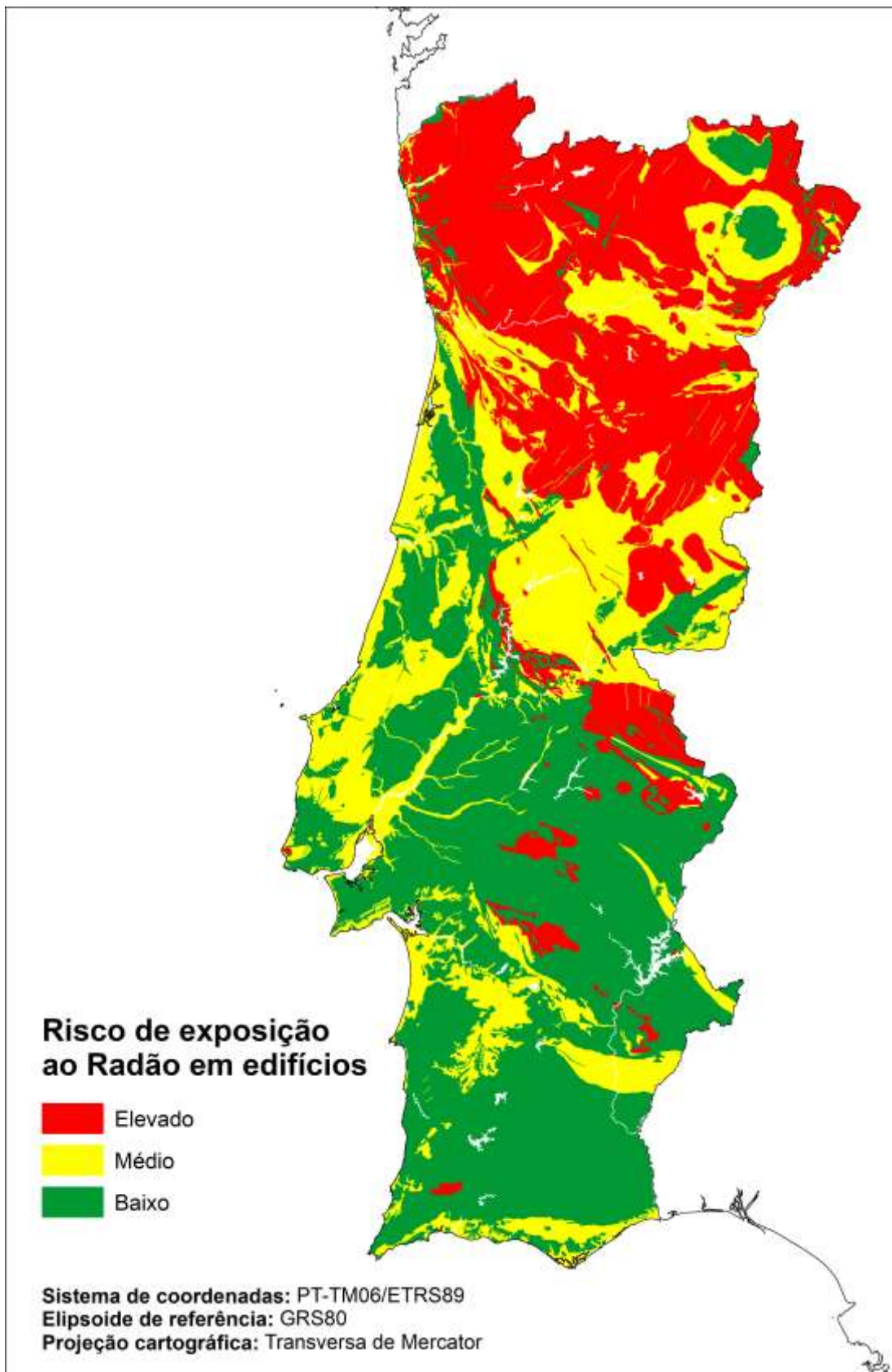


Figura 5.5 – Mapa de risco de exposição ao gás radão em edifícios no território continental.

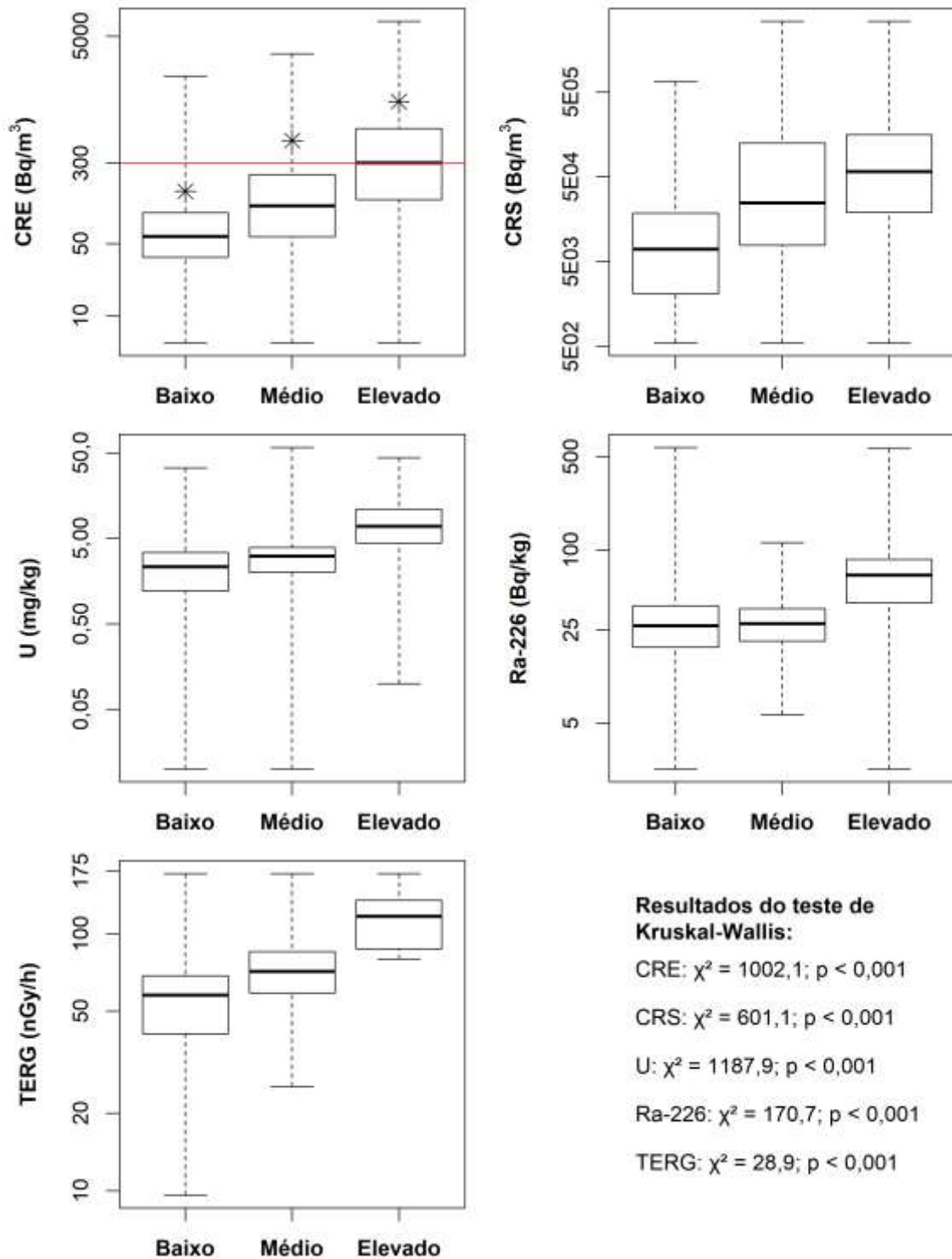


Figura 5.6 – Diagramas de extremos e quartis de todos os resultados obtidos para as diferentes variáveis por nível de risco (baixo, médio e elevado). No gráfico de CRE, a linha a vermelho indica o nível de referência e os asteriscos representam o percentil 90. Os resultados do teste de Kruskal-Wallis (com dois graus de liberdade) indicados no canto inferior direito revelam que existem diferenças significativas entre os níveis de risco e para todas as variáveis.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos realizados no presente estudo incluíram uma campanha que abrangeu todo o território continental e que visou a obtenção de informação complementar sobre a distribuição das concentrações de gás radão no interior de habitações. Estes dados bem como os que foram coligidos da literatura ou disponibilizados pelo LRN-UC, neste último caso adquiridos ao longo de mais de 20 anos de investigação e prestações de serviços, foram devidamente organizados e inseridos em bases de dados coerentes; estas comportam, na totalidade, alguns milhares de dados de natureza muito diversa.

Como elemento de base de suporte cartográfico a todo o trabalho de investigação optou-se pela unidade geológica, tal como mapeada à escala 1:1 000 000, atendendo à reconhecida importância que as variáveis de natureza geogénica têm no controlo e na distribuição do radão no interior das habitações.

Na modelação do risco de exposição ao gás radão optou-se pela aplicação de um método assente numa classificação binária, suportada na análise da curva característica de operação do recetor (do inglês "*Receiver Operating Characteristic Curve*", ROC). O conjunto da informação disponível foi utilizado na metodologia proposta, usando as variáveis geogénicas como preditores da excedência do nível de referência de concentração do gás radão, de 300 Bq/m³, em pelo menos 10% das habitações numa determinada área geográfica. Foi definido um Índice de Risco para cada uma das unidades geológicas aflorantes no território continental português que conjuga e integra os diferentes sistemas de classificação binária obtidos, para cada uma das variáveis em estudo. Este índice constitui um indicador da suscetibilidade de uma determinada área geográfica à ocorrência de concentrações de radão no ar interior superiores a 300 Bq/m³ em pelo menos 10% das habitações, delimitada pelas unidades geológicas. Com o objetivo de representar espacialmente a distribuição do risco e de suportar a definição de prioridades na gestão territorial, os valores dos índices de risco foram agrupados em três classes (baixo, médio e elevado) e representados cartograficamente à escala 1:1 000 000. A diferença observada entre os diferentes níveis de risco revelou-se estatisticamente significativa (para dois graus de liberdade) em relação a cada uma das variáveis analisadas, o que constitui um indicador claro da existência de zonas com características de suscetibilidade distintas. Esta distinção reforça a necessidade de diferenciação nas estratégias de intervenção e nas prioridades de atuação, em função do grau de risco associado a cada área. A intervenção deve assumir carácter prioritário nas áreas classificadas com risco elevado, uma vez que

estas áreas apresentam risco potencial mais significativo para a saúde pública e maior probabilidade de excedência do NR.

As designadas ZSER (ou zonas com elevado potencial de exposição ao radão) ocorrerão assim com maior probabilidade em unidades geológicas compostas por rochas de natureza granítica ou sienítica, e em alguns casos, também por rochas metassedimentares, aflorantes maioritariamente nas regiões norte e centro do território continental português.

O mapa apresentado foi construído e validado a partir da modelação da informação disponível no presente, pelo que é expectável que o conhecimento de novos dados no futuro conduza, naturalmente, a modificações no produto agora apresentado. Contudo, a metodologia que serviu de suporte à elaboração do presente mapa está preparada para responder de uma forma rápida a esse desafio, permitindo a obtenção de um novo produto com um custo reduzido em recursos humanos e materiais.

7. REFERÊNCIAS

- Barnet, I., Pacherová, P., Preusse, W., & Stec, B., 2010. Cross-border radon index map 1: 100 000 Lausitz–Jizera–Karkonosze–Region (northern part of the Bohemian Massif). *Journal of environmental radioactivity*, 101(10), 809-812.
- 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.
- Batista, M.J., Prazeres, C., de Oliveira, D., & Leote, J., 2012. Radiometric map of Portugal. In: Workshop on Recent Developments in Evaluation of Uranium and Thorium Resources.
- Borgoni, R., Tritto, V., Bigliotto, C., & de Bartolo, D., 2011. A geostatistical approach to assess the spatial association between indoor radon concentration, geological features and building characteristics: the case of Lombardy, Northern Italy. *International journal of environmental research and public health*, 8(5), 1420-1440.
- Bossey, P., 2013. A radon risk map of Germany based on the geogenic radon potential. In: Pardo-Igúzquiza, E., *et al.*, (Eds.), *Mathematics of Planet Earth, Lecture Notes in Earth System Sciences*. Springer, pp. 527e531. Pres., IAMG (Intl. Ass. Math. Geosciences) 2013, Madrid 2e6 Sept 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/9783-642-32408-6-115>.
- Bossey, P., 2014. Determination of radon prone areas by optimized binary classification. *Journal of environmental radioactivity*, 129, 121-132.
- Bossey, P., 2015a. Estimation of radon prone areas through binary classification, part 2: Radon prone geologies. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2015. Vol.

141, p. 44–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.11.020>Bossew, P., 2015b. Mapping the geogenic radon potential and estimation of radon prone areas in Germany. *Radiat. Emerg. Med.*, 4(2), 13-20.

Bossew, P., 2017. Local probability of indoor radon concentration to exceed the threshold estimated from geogenic radon potential. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 32(1), 70-76.

Bossew, P., 2018. Radon priority areas-definition, estimation and uncertainty. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 33(3), 286-292.

Bossew, P., Cinelli, G., Ciotoli, G., Crowley, Q. G., de Cort, M., Medina, J., Gruber, V., Petermann, E., & Tollefsen, T., 2020. Development of a geogenic radon hazard index. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, no. 11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114134>.

Bruno, R.C., 1983. Sources of indoor radon in houses: a review. *Journal of the Air Pollution Control Association* 33, 105–109.

Chen, J., 2009. A preliminary design of a radon potential map for Canada: a multi-tier approach. *Environmental Earth Sciences*, 59(4), 775-782.

Cinelli, G., de Cort, M., & Tollefsen, T., (Eds.), 2019, *European Atlas of Natural Radiation*, Publication Office of the European Union, Luxembourg. Disponível em <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/european-atlas-natural-radiation-0>.

Cinelli, G., Tollefsen, T., Bossew, P., Gruber, V., Bogucarskis, K., De Felice, L., & de Cort, M., 2019. Digital version of the European Atlas of natural radiation. *Journal of environmental radioactivity*, 196, 240-252.

Cinelli, G., Tondeur, F., & Dehandschutter, B., 2011. Development of an indoor radon risk map of the Walloon region of Belgium, integrating geological information. *Environmental Earth Sciences*, 62(4), 809-819.

Cinelli, G., Tositti, L., Capaccioni, B., Brattich, E., & Mostacci, D., 2015. Soil gas radon assessment and development of a radon risk map in Bolsena, Central Italy. *Environmental geochemistry and health*, 37(2), 305-319.

Ciotoli, G., Voltaggio, M., Tuccimei, P., Soligo, M., Pasculli, A., Beaubien, S. E., & Bigi, S., 2017. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation. *Journal of environmental radioactivity*, 166, 355-375.

Conselho da União Europeia. Diretiva 2013/59/Euratom do Conselho, de 5 de dezembro de 2013. *Journal of the European Union*, L(13):1-73.

Decreto-Lei nº 108/2018. Diário da República n.º 232/2018, Série I de 2018-12-03. Presidência do Conselho de Ministros, Lisboa.

Direção Geral do Território, 2020. Carta Administrativa Oficial de Portugal, versão de 2019. Disponível em http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/.

Domingos, F., Cinelli, G., Neves, L., Pereira, A., Braga, R., Bossew, P., & Tollefsen, T., 2020. Validation of a database of mean uranium, thorium and potassium concentrations in rock samples of Portuguese geological units, generated of literature

data. *Journal of Environmental Radioactivity*, 222, 106338, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106338>.

- Drolet, J. P., Martel, R., Poulin, P., Dessau, J. C., Lavoie, D., Parent, M., & Lévesque, B., 2013. An approach to define potential radon emission level maps using indoor radon concentration measurements and radiogeochemical data positive proportion relationships. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 124, p. 57–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.04.006>.
- Drolet, J. P., Martel, R., Poulin, P., & Dessau, J. C., 2014. Methodology developed to make the Quebec indoor radon potential map. *Science of the total environment*, 473, 372-380.
- Dubois, G., 2005. An overview of radon surveys in Europe. EUR 21892 EN.
- Elío, J., Crowley, Q., Scanlon, R., Hodgson, J., & Long, S., 2017. Logistic regression model for detecting radon prone areas in Ireland. *Science of The Total Environment*, 599, 1317-1329.
- Elío, J., Crowley, Q., Scanlon, R., Hodgson, J., & Zgaga, L., 2018. Estimation of residential radon exposure and definition of Radon Priority Areas based on expected lung cancer incidence. *Environment international*, 114, 69-76.
- EPA, 2020. Radon map. <https://www.epa.ie/radiation/radonmap/>. Consultado a 7 de dezembro de 2020.
- ESRI, 2017. ArcGIS version 10.5.1. Environmental Systems Resource Institute, Redlands, CA.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, no. 8, p. 861–874. DOI 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- Fojtikova, I., Barnet, I., & Marusiakova, M., 2011. Radon index of a local administrative unit. *Radiation protection dosimetry*, 145(2-3), 107-109.
- Friedmann, H., & Gröller, J., 2010. An approach to improve the Austrian Radon Potential Map by Bayesian statistics. *Journal of environmental radioactivity*, 101(10), 804-808.
- García-Talavera, M., & López, F. J., 2019. Cartografía del potencial de radón de España. *Colección Informes Técnicos 51.2019*, Referencia INT-04.41, 70 p.
- García-Talavera, M., García-Pérez, A., Rey, C., & Ramos, L., 2013. Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information. *Journal of radiological protection*, 33(3), 605.
- Giustini, F., Ciotoli, G., Rinaldini, A., Ruggiero, L., & Voltaggio, M., 2019. Mapping the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Bayesian Kriging regression: A case study from a volcanic area of central Italy. *Science of The Total Environment*, 661, 449-464.
- Gräler, B., Pebesma, E., & Heuvelink, G., 2016. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. *The R Journal*, 8, 204-218. <https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-014/index.html>.
- Grasty, R. L., Tauchid, M., & Torres, L. M. M., 1993. Standardization of old gamma ray survey data. In: *Application of Uranium Exploration Data and Techniques in Environmental Studies. Proceedings of a Technical Committee Meeting IAEATECDOC-827*. Vienna, 9-12 November.

- Gruber, V., Bossew, P., De Cort, M., & Tollefsen, T., 2013. The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*, 33(1), 51.
- IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 471.
- Ielsch, G., Cushing, M. E., Combes, P., & Cuney, M., 2010. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne. *Journal of environmental radioactivity*, 101(10), 813-820.
- Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R. & Valdivia-Manchego, M., 1999. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Radon in the living environment*, 073.
- Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R. & Valdivia-Manchego, M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Science of the Total Environment*, 272, 1–3, 217– 230. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00696-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00696-9)
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A. & Valdivia-Manchego, M., 2009. From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany. *Environmental Geology*. 2009. Vol. 56, no. 7, p. 1269–1279. DOI 10.1007/s00254-008-1226-z.
- Khanjer, E. F., & Abdullha, W., 2017. Using inverse distance weighting interpolation method to prepare maps of radon concentrations distribution in Wasit province. *International Journal of Science and Nature*, volume 8(2), ISSN 2229 – 6441.
- Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J. P., Murith, C., Palacios, M., & Baechler, S., 2015. Improved predictive mapping of indoor radon concentrations using ensemble regression trees based on automatic clustering of geological units. *Journal of Environmental Radioactivity*, 147, 51-62.
- LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), 2010. Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Unidade de Geologia, Hidrogeologia e Geologia Costeira.
- LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), 2020. <https://geoportal.lneg.pt/mapa/#>. Consultado a 7 de dezembro de 2020.
- LRN, 2020. Base de dados radiológicos do Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra. Dados não publicados.
- Matthews, B. W., 1975. Comparison of the predicted and observed secondary structure of t4 phage lysozyme, *Biochimica Biophysica Acta*, 405 (2), 442–451.
- Mostečak, A., Perković, D., Kapor, F., & Veinović, Ž., 2018. Radon mapping in Croatia and its relation to geology. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 33(3), 1-11.
- Neznal, M., Neznal, M., Matolin, M., Barnet, I., & Miksova, J., 2004. The new method for assessing the radon risk of building sites (p. 48). Czech Geological Survey.
- Pasculli, A., Palermi, S., Sarra, A., Piacentini, T., & Miccadei, E., 2014. A modelling methodology for the analysis of radon potential based on environmental geology and geographically weighted regression. *Environmental modelling & software*, 54, 165-181.

- Pásztor, L., Szabó, K. Z., Szatmári, G., Laborczi, A., & Horváth, Á., 2016. Mapping geogenic radon potential by regression kriging. *Science of the Total Environment*, 544, 883-891.
- Pebesma, E. J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30, 683-691.
- Pereira A., Lamas R., Miranda M., Domingos F., Neves L., Ferreira N., & Costa L., 2017. Estimation of the radon production rate in granite rocks and evaluation of the implications for geogenic radon potential maps: A case study in Central Portugal. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 270-277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.08.022>.
- Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M., & Neves, L. J. P. F., 2010. On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 10, pp. 875-882.
- Petermann, E., Meyer, H., Nussbaum, M., & Bossew, P., 2021. Mapping the geogenic radon potential for Germany by machine learning. *Science of the Total Environment*, 754, 142291.
- R Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Revelle, W., 2018. psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, <https://CRAN.Rproject.org/package=psych> Version = 1.8.12.
- Sanford, R. F., Pierson, C. T., & Crovelli, R. A., 1993. An objective replacement method for censored geochemical data. *Mathematical Geology*, 25(1), 59-80.
- Saraiva, J. M., Torres, L. M. M., & Leote, J., 1998. Aplicações da cartografia radiométrica na proteção ambiental e na prospeção de recursos. In: *Proceedings of the IX Assembleia Nacional de Geodesia y Geofísica*, 9-13 February, Almeria, Spain.
- Sarra, A., Fontanella, L., Valentini, P., & Palermi, S., 2016. Quantile regression and Bayesian cluster detection to identify radon prone areas. *Journal of environmental radioactivity*, 164, 354-364.
- Szabó, K. Z., Jordan, G., Horváth, Á., & Szabó, C., 2014. Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary. *Journal of environmental radioactivity*, 129, 107-120.
- Tauchid, M., & Grasty, R.L., 2002. Natural Background Radioactivity of the Earth's Surface Essential Information for Environmental Impact Studies. IAEA, pp. 230–242. IAEASM-362/25.
- Tharwat, A., 2020. Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*.
- Timkova, J., Fojtikova, I., & Pacherova, P., 2017. Bagged neural network model for prediction of the mean indoor radon concentration in the municipalities in Czech Republic. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 398-402.
- Tollefsen, T., Cinelli, G., Bossew, P., Gruber, V. & De Cort, M., 2014. From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 162, 1–2, 129–134.

- Torres, L., Leote, J., & Silva, M., 1997. Carta de Radiação Gama Natural na escala 1/200 000. Departamento de Geologia, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Torres, L.M., & Grasty, R.L., 1993. The Natural Radioactivity Map of Portugal. In Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. In: Proceedings of a Technical Committee Meeting IAEA-TECDOC-827. Vienna, 9-12 November.
- UK, 2020. UK maps of radon. <https://www.ukradon.org/information/ukmaps>. Consultado a 7 de dezembro de 2020.
- Zhu, H. C., Charlet, J. M., & Poffijn, A., 2001. Radon risk mapping in southern Belgium: an application of geostatistical and GIS techniques. Science of the Total Environment, 272(1-3), 203-210.

Professor catedrático e Diretor
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

8. Anexos

Significado dos símbolos referentes a cada unidade geológica (Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010)).

Unidade Geológica	Legenda	Mediana da TERG (nGy/h)
C1_a	Filitos e metacalcários	83,20
C1_b	Filitos, metassiltitos e metacalcários	83,20
C1-2	Filitos, metagrauvaques e metaconglomerados (<i>flysch</i>)	66,10
C2	Conglomerados, arenitos, argilitos e carvão	63,60
CVL	Basaltos, piroclastos, microgabros, raros gabros e intercalações sedimentares (Complexo Vulcânico de Lisboa: 75-72 Ma)	9,60
D1_a	Filitos, quartzitos e metacalcários	79,70
D1_b	Filitos, quartzitos e metacalcários	73,95
D1f_a	Filitos e metagrauvaques (<i>flysch</i>)	116,70
D1f_b	Filitos, metagrauvaques e raros metaconglomerados (<i>flysch</i>)	71,30
D2-3	Filitos, metaquartzovaques, quartzitos e metacalcários	66,10
D2-3_a	Anfibolitos, metaperidotitos e metagabros (crusta oceânica)	33,40
D2-3f	Filitos, metassiltitos, metaquartzovaques (<i>flysch</i>) e metavulcanitos ácidos e básicos associados	73,95
D2C1	Metavulcanitos ácidos e básicos, metargilitos e metacalcários	51,60
D3C1	Metavulcanitos ácidos a básicos e filitos (Faixa Piritosa)	68,70
DA	Metaquartzovaques, quartzofilitos e metavulcanitos básicos	40,75
E	Arenitos, arcoses, conglomerados, argilitos e siltitos	49,05
ep1	Metaconglomerados, filitos, quartzofilitos, metavulcanitos ácidos a básicos e peralcalinos.	58,95
ep1c	Metacalcários	56,50
ep2	Filitos, quartzofilitos e metavulcanitos ácidos e básicos	71,30
epL	Micaxistos com intrusões de basaltos e gabros, metamorizados	49,05
f	Pórfiros graníticos	73,95
f1	Filões básicos	66,10
f2	Filões básicos	171,25
g	Granitos e gnaisses migmatíticos	171,25
g1_a	Granitos de duas micas	134,80
g1_b	Granitos biotíticos com plagioclase cálcica	157,55
g1a	Tonalitos e granodioritos	61,30
g2_a	Granitos de duas micas	116,70

Unidade Geológica	Legenda	Mediana da TERG (nGy/h)
g2_b	Granitos biotíticos com plagioclase cálcica	171,25
g3	Granitos biotíticos	134,80
g4	Granito biotítico de Sintra	87,20
GAMA	Gabros, anortositos e dioritos	51,60
GAMA1	Dioritos e gabros	96,75
GAMA2	Dioritos e gabros de Sintra e Sines	63,60
GAMAZ	Gabros e peridotitos deformados	66,10
gap	Pórfiros graníticos e aplito-pegmatitos	157,55
gz	Ortognaisses, granitos e dioritos deformados	87,20
J1	Calcários, margas e dolomitos; magmatismo básico: vulcanitos e filões (200-180 Ma)	40,75
J2	Calcários, margas e dolomitos	25,40
J3	Calcários, margas e arenitos	46,50
K1	Arenitos, calcários, margas e dolomitos; magmatismo básico: 135-130 Ma	43,85
K1-2	Calcários (com rudistas no topo, a sul de Leiria), arenitos, margas e dolomitos; magmatismo básico: 94-88 Ma	37,15
K2	Arenitos e argilitos	51,60
N1c	Arenitos, argilitos, conglomerados e calcários (depósitos continentais)	33,40
N1m	Conglomerados, arenitos, biocalcarenitos, siltitos e argilitos (depósitos marinhos)	33,40
N2	Arenitos, conglomerados e siltitos	29,60
NP1	Xistos, gnaisses, migmatitos, anfíbolitos, granulitos e eclogitos retrogradados	56,50
NP2	Filitos, metagrauvaques, metachertes, metaconglomerados, metacalcários e xistos	61,30
NPA1	Metaperidotito	20,90
NPA2	Gnaisses quartzofeldspáticos com eclogitos intercalados	46,50
NPep	Filitos, metagrauvaques, metaquartzovaques, metaconglomerados, metacalcários e xistos (flysch), gnaisses e migmatitos	71,30
NPL	Ortognaisses ocelados com intrusões de basaltos e gabros, metamorfizados	58,95
O_a	Quartzitos, filitos, quartzofilitos, metaconglomerados, metacalcários e metavulcanoclastitos	87,20
O_b	Quartzitos, filitos, quartzofilitos, metaconglomerados, metacalcários e metabasaltos	73,95
O_c	Peridotitos, gabros e basaltos metamorfizados e metarradiolaritos intercalados (crusta oceânica)	61,30
OA	Quartzofilitos, quartzitos e metavulcanitos	76,70
OD1	Mármore e metavulcanitos básicos	56,50
ODP	Quartzitos xistóides e quartzofilitos com intercalações de quartzitos, metachertes e metacalcários	96,75

Unidade Geológica	Legenda	Mediana da TERG (nGy/h)
pi	Granófiros, pórfiros e riolitos	76,70
Q1	Conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos	37,15
Q2	Areias, cascalheiras, siltes e argilas	25,40
qz	Filões de quartzo sigma - Ortognaisses graníticos e metassienitos peralcalinos	171,25
S	Filitos, xistos, metachertes e metacalcários	102,40
SA	Filitos, xistos quartzo-feldspáticos, xistos verdes, e metavulcanitos básicos e ácidos	71,30
SD	Filitos e quartzitos	87,20
SD1	Metagrauvaques, quartzitos, metassiltitos, metachertes, filitos, quartzofilitos e metavulcanitos ácidos e básicos	76,70
SDof	Anfibolitos, xistos verdes, metavulcanitos ácidos e básicos, metagabros retrogradados	15,75
SDof_a	Serpentinitos, peridotitos e piroxenitos retromorfizados	15,75
SDP	Filitos e metaquartzovaques com intercalações de quartzitos, metachertes e metacalcários	87,20
v	Xistos verdes (crusta oceânica), equivalente a D2-3_a (?)	76,70
sigma	Ortognaisses graníticos e metassienitos peralcalinos (490-470 Ma)	68,70
sigma1	Metavulcanitos peralcalinos	61,30
sigma2	Sienitos de Sintra e Sines e sienitos nefelínicos de Monchique	125,30
TJ1	Arenitos, argilitos e evaporitos com intercalações carbonatadas; magmatismo básico: vulcanitos e filões (200-180 Ma)	43,85