

Monitorização da concentração de radão (^{222}Rn) em edifícios da cidade de Ponta Delgada: contribuição para o estudo da desgaseificação difusa e implicações para a saúde pública

Dissertação de Mestrado

Mónica Andreia do Carmo Fonseca Maia

Mestrado em

Vulcanologia e Riscos Geológicos



Ponta Delgada

2024

Monitorização da concentração de radão (^{222}Rn) em edifícios da cidade de Ponta Delgada: contribuição para o estudo da desgaseificação difusa e implicações para a saúde pública

Dissertação de Mestrado

Mónica Andreia do Carmo Fonseca Maia

Orientadoras

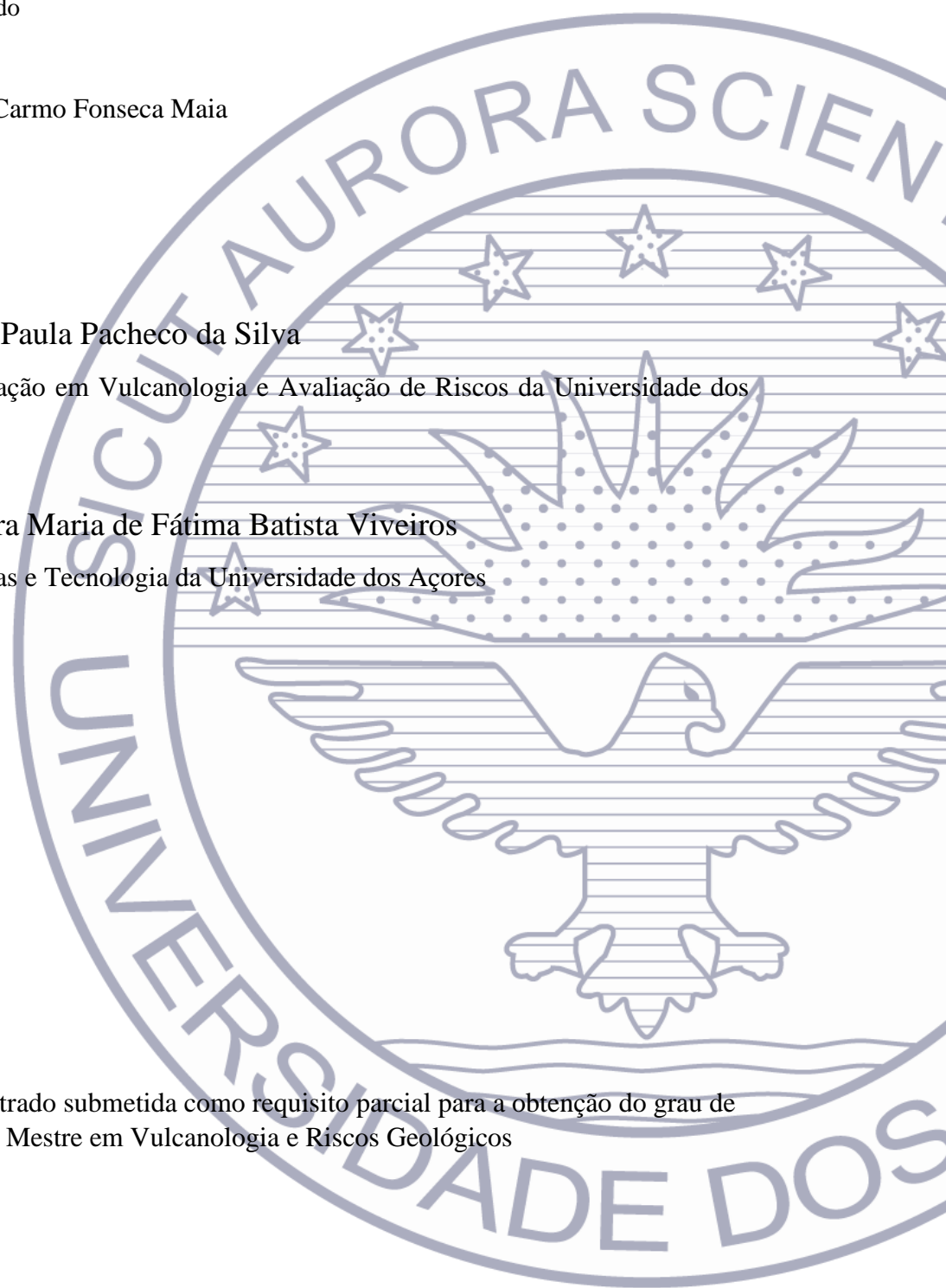
Doutora Catarina Paula Pacheco da Silva

Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos da Universidade dos Açores

Professora Doutora Maria de Fátima Batista Viveiros

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade dos Açores

Dissertação de Mestrado submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos



Índice

Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas.....	VIII
Índice de Fotos	IX
Lista de Acrónimos	XI
Agradecimentos.....	XIII
Resumo.....	XV
Abstract	XVIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Nota prévia.....	1
1.2 Radiação Natural.....	2
1.3 Radão (^{222}Rn).....	4
1.4 Radão e Saúde.....	5
1.5 Radão em Edifícios.....	8
1.5.1 Fontes de Radão nos Edifícios	8
1.5.2 Fatores Externos que Influenciam a Concentração de Radão no Ar Interior	17
1.5.3 Medidas de Mitigação	19
2 Caracterização da Área de Estudo.....	22
2.1 Nota Prévia	22
2.2 Localização Geográfica	22
2.3 Enquadramento Geotectónico.....	24
2.4 Enquadramento Geológico	26
2.4.1 Geomorfologia.....	26
2.4.2 Tectónica	30
2.4.3 Vulcanoestratigrafia	33
2.5 Sismicidade e Erupções Vulcânicas Históricas	35
2.6 Vulcanismo secundário.....	45
3 Ensaio de Monitorização Contínua da Concentração de Radão no Ar Interior de um Edifício.....	46
3.1 Nota Prévia	46
3.2 Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados.....	46
3.2.1 Equipamento e Amostragem	46

3.2.2	Local de Amostragem.....	46
3.2.3	Recolha e Análise Estatística dos Dados.....	47
3.3	Apresentação dos resultados.....	51
3.4	Discussão.....	59
3.4.1	Análise de Regressão Múltipla.....	59
3.4.2	Análise Espectral.....	62
3.4.3	Saúde Pública.....	66
3.4.4	Considerações Gerais.....	68
4	Cartografia da Concentração de Radão no Ar Interior de Edifícios.....	71
4.1	Nota Prévia.....	71
4.2	Metodologia de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados.....	71
4.2.1	Equipamento.....	71
4.2.2	Amostragem.....	73
4.2.3	Recolha e Análise dos Dados.....	73
4.3	Apresentação de Resultados.....	74
4.4	Discussão.....	76
4.4.1	Considerações Gerais.....	87
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
	BIBLIOGRAFIA.....	93
	ANEXOS.....	A
	ANEXO I.....	A-1
	ANEXO II.....	A-9
	ANEXO III.....	A-14

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Séries de decaimento do urânio-238, tório-232 e urânio-235. As setas verticais indicam o decaimento com emissão de partículas alfa e as setas diagonais indicam o decaimento com emissão de partículas beta. Para os radionuclídeos que têm mais de um modo de decaimento, apenas o que ocorre com mais frequência é representado. A vermelho encontra-se assinaladas as posições do ^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn (modificado de Kölbl et al., 2020).	4
Figura 1.2 - Contribuição das diversas fontes para o nível de radão nos edifícios (Neves & Pereira, 2004).	8
Figura 1.3 - Vias de penetração do radão nos edifícios (Robé, 2004, in: Ferreira & Coelho, 2006).	9
Figura 1.4 - Fatores que interferem com a concentração de radão no ar interior (adaptado de Gruber et al., 2013).	10
Figura 1.5 - Representação esquemática do processo de emissão do radão através dos solos (modificado de Phong et al., 2020).	12
Figura 2.1 - Localização geográfica do arquipélago dos Açores (in: Medeiros, 2018).	23
Figura 2.2 – Localização das freguesias de Santa Clara, São José, São Sebastião e São Pedro, Ponta Delgada, ilha de São Miguel (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).....	24
Figura 2.3 - Enquadramento tectónico do arquipélago dos Açores (batimetria regional de Lourenço et al., 1998). Legenda: NA – Placa Norte-Americana; EU – Placa Eurasiática; NU – Placa Núbia; CMA – Crista Média Atlântica; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – Rift da Terceira; FG – Falha Gloria; FO – Ilhéus das Formigas; DF – Desfiladeiro das Formigas; BSM – Bacia de São Miguel; BM – Banco do Mónaco; FH - Fossa Hirondelle; BJC - Banco D. João de Castro; BEG - Bacia Este da Graciosa; BWG - Bacia Oeste da Graciosa; BA – Banco Açor; BPA - Banco Princesa Alice (in: Aguiar, 2018).	25
Figura 2.4 - Identificação dos complexos vulcânicos da ilha de São Miguel. 1 - Complexo Vulcânico das Sete Cidades; 2 - Sistema Vulcânico Fissural dos Picos; 3 - Complexo Vulcânico do Fogo; 4 - Sistema Vulcânico Fissural do Congro; 5 - Complexo Vulcânico das Furnas; 6 - Complexo Vulcânico da Povoação; 7 - Complexo Vulcânico do Nordeste. (adaptado de Moore, 1991b, in: Gaspar et al., 2015a) (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).....	26
Figura 2.5 - Principais estruturas vulcânicas da ilha de São Miguel (dados de Gaspar et al., 1995; Queiroz, 1995; Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000; Carmo et al., 2009; Carmo et al., 2015). Coordenadas UTM, zona 26S, Datum WGS84 (in: Pacheco et al., 2012).	27
Figura 2.6 - Projeção dos limites espaciais (a vermelho) considerados para o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. Coordenadas UTM, da zona 26S (in: Ferreira, 2000).	28

Figura 2.7 - Distribuição de centros eruptivos na área definida para o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. Coordenadas UTM, da zona 26S. (in: Ferreira, 2000).	29
Figura 2.8 - Mapa hipsométrico da região centro-oeste da ilha de São Miguel. Coordenadas UTM, da zona 26S (in: Ferreira, 2000).	30
Figura 2.9 - Mapa vulcanotectónico da ilha de São Miguel (Carmo, 2013). Legenda: MG – Graben dos Mosteiros; SVA – Alinhamento Vulcânico Sul; NVA – Alinhamento Vulcânico Norte; GRG – Graben da Ribeira Grande; AF1 – Falha Altiprado 1; AF2 – Falha Altiprado 2; ARG – Graben de Água Retorta. Coordenadas UTM, zona 26S (adaptado de Carmo et al., 2015).	31
Figura 2.10 - Localização dos centros eruptivos do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. A rosa estão indicados os centros <5 ka (adaptado de Ferreira et al., 2015).	32
Figura 2.11 - Principais estruturas vulcanotectónicas do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Carmo, 2013) e histograma circular de frequências não ponderadas das direções do plano de falha (TectonicsFP software; Ortner et al., 2002). SVA - Alinhamento Vulcânico Sul; NVA - Alinhamento Vulcânico Norte (adaptado de Carmo et al., 2015).	32
Figura 2.12 - Cartografia de depósitos vulcânicos de antigas erupções que afetaram a área onde se localiza a cidade de Ponta Delgada e a sua respetiva legenda (adaptado de Moore, 1991).	34
Figura 2.13 - Carta epicentral dos Açores no período compreendido entre 1980 e 2023 (CIVISA, dados não publicados).	36
Figura 2.14 - Localização dos principais sismos destruidores na região dos Açores (in: Gaspar et al., 2015b).	37
Figura 2.15 - Carta da sismicidade da ilha de São Miguel no período de 1980 a 2001 (CIVISA, dados não publicados; in: Medeiros, 2004).	38
Figura 2.16 - Localização das erupções vulcânicas históricas conhecidas no arquipélago dos Açores (Gaspar et al, 2015b).	40
Figura 2.17 - Localização das erupções históricas da ilha de São Miguel e área circundante (Ferreira, 2000).	40
Figura 2.18 – Vista do Google Earth com a distribuição das escoadas lávicas da erupção de 1563 (in: Wallenstein et al., 2015).	42
Figura 2.19 – Cartografia dos produtos vulcânicos considerados pertencentes à erupção de 1652, segundo interpretações de (a) Webster (1821/1982), Friedlander (1929), Agostinho (1936), Zbyszewski et al. (1959) e Weston (1964) e (b) Moore (1991a) (in: Ferreira et al., 2015).	43
Figura 2.20 – Interpretação morfoestrutural da erupção de 1652. A – Pico do Paio (Fogo 2); B – Pico de João Ramos (Fogo 1); C2, C2 e C3 centros eruptivos da erupção de 1652; F – Falha associada à fissura eruptiva. As linhas finas identificam as crateras e as linhas mais grossas identificam a base das formas vulcânicas. As setas indicam a direção do fluxo das escoadas (coulées) (in: Ferreira et al., 2015).	44

Figura 3.1 - Histograma dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior no local de amostragem.....	48
Figura 3.2 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício selecionado.	51
Figura 3.3 - Variação temporal da concentração de radão e da humidade relativa no ar interior do edifício para o período compreendido entre 16 e 27 de abril de 2023.	53
Figura 3.4 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da temperatura no ar exterior para o período compreendido entre 10 e 18 de dezembro de 2022...	53
Figura 3.5 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da pressão barométrica no ar exterior para o período compreendido entre 20 e 25 de abril de 2023.	54
Figura 3.6 - Espectro de amplitudes da concentração de radão no ar interior, no edifício amostrado, para o período de 29 de junho de 2022 a 13 de outubro de 2023 cpd = ciclo por dia.	56
Figura 3.7 - Espectrograma da concentração de radão no ar interior, no edifício amostrado, para o período de 29 de junho de 2022 a 13 de outubro de 2023.....	56
Figura 3.8 – Espectro de amplitudes de baixas frequências da concentração de radão no ar interior do edifício. A sombreado amarelo estão assinalados os incrementos associados a 341, 137 e 76 dias.....	58
Figura 3.9 - Variação temporal dos dados log ₁₀ -transformados da concentração de radão no ar interior observados no local de amostragem, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 3.2 e dos respetivos resíduos calculados.	59
Figura 3.10 - Variação temporal da concentração de radão e da humidade relativa no ar interior no local de amostragem para o período compreendido entre 15 de março e 18 de setembro de 2023.....	60
Figura 3.11 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da temperatura no ar interior para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 8 de outubro de 2023.....	61
Figura 3.12 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da pressão barométrica no ar interior para o período compreendido entre 22 de julho e 13 de outubro de 2023.....	61
Figura 3.13 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior no local de amostragem para o período compreendido entre 15 e 21 de julho de 2022. Variações cíclicas associadas a um e dois ciclos por dia.....	63
Figura 3.14 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior e temperatura no ar exterior para o período compreendido entre 1 e 6 de setembro de 2023.....	63
Figura 3.15 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior e da pressão barométrica no ar exterior para o período compreendido entre 7 e 13 de outubro de 2023.....	64

Figura 3.16 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado para o período compreendido entre julho de 2022 e setembro de 2023.....	65
Figura 3.17 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado para o período compreendido entre 29 de junho de 2022 e 29 de junho de 2023. A linha laranja representa o nível de referência previsto na legislação nacional.....	67
Figura 3.18 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023. A linha laranja representa o nível de referência previsto na legislação nacional.....	67
Figura 3.19 – Variação temporal da pressão barométrica no interior e no exterior do edifício amostrado para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.	69
Figura 4.1 - Localização dos pontos amostrados (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).....	74
Figura 4.2 - Concentração de radão no ar interior de edifícios, nas campanhas realizadas no verão e no inverno, na área de estudo.	75
Figura 4.3 - Concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e pela legislação nacional nas campanhas de verão (esquerda) e inverno (direita).....	77
Figura 4.4 - Média anual da concentração de radão no ar interior dos edifícios.....	79
Figura 4.5 - Distribuição dos pontos amostrados com a concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional para a campanha de verão. A – Zona oeste; B – Zona centro-este (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).	80
Figura 4.6 - Distribuição dos pontos amostrados com a concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional para a campanha de inverno. A – Zona oeste; B – Zona centro-este (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).	80
Figura 4.7 - Distribuição dos pontos amostrados com a média anual da concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional. A – Zona oeste; B – Zona centro-este (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).....	81
Figura 4.8 – Sistema de abastecimento de água de Ponta Delgada (SMAS) e municípios. PDL – Ponta Delgada; LAG – Lagoa; VFC – Vila Franca do Campo; POV – Povoação; NOR – Nordeste (modificado de Valente et al., 2022).....	82
Figura 4.9 – Distribuição geográfica do teor de ²²² Rn em nascentes na ilha de São Miguel, campanha realizada no verão (modificado de Branco et al., 2021).....	83

Figura 4.10 – Sobreposição de um excerto da cartografia de depósitos de antigas erupções que afetaram a área onde se localiza a cidade de Ponta Delgada e a sua respetiva legenda (Moore, 1991) com a distribuição dos pontos amostrados com a média anual de concentração de radão no ar interior dos edifícios, tendo em conta o limite recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84)..... 84

Figura 4.11 - Principais estruturas vulcanotectónicas do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Carmo, 2013) e histograma circular de frequências não ponderadas das direções do plano de falha (TectonicsFP software; Ortner et al., 2002). SVA - Alinhamento Vulcânico Sul; NVA - Alinhamento Vulcânico Norte. A azul estão assinalados os possíveis prolongamentos das estruturas já cartografadas até à cidade de Ponta Delgada (adaptado de: Carmo et al., 2015). .. 85

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Risco de contrair cancro do pulmão devido à exposição ao radão em fumadores e em não fumadores (modificado de USEPA, 2009a; 2009b, <i>in</i> : Silva, 2013).....	7
Tabela 1.2 - Concentração de urânio em rochas e minerais (modificado de Wiegand, 2001)	11
Tabela 1.3 - Concentração de ^{238}U em rochas magmáticas (modificado de Wiegand, 2001, <i>in</i> : Silva, 2013).....	11
Tabela 1.4 - Concentrações de atividades típicas e máximas em materiais de construção comuns e subprodutos industriais utilizados em materiais de construção na União Europeia. As concentrações típicas são médias nacionais ponderadas pela população de diferentes Estados-Membros. O máximo das concentrações são valores máximos relatados em EC, 1999 (retirado de EC, 1999).....	15
Tabela 1.5 - Lista dos materiais de construção que suscitam preocupação do ponto de vista da proteção radiológica, de acordo com o artigo n.º 154 do Decreto-Lei n.º 108/2018 (APA, s.d).	16
Tabela 2.1 - Principais sismos históricos que afetaram a ilha de São Miguel (adaptado de Wallenstein, 1999).	38
Tabela 3.1 - Estatística descritiva dos dados da concentração de radão e dos parâmetros ambientais obtidos no local de amostragem para o período total de amostragem e dos parâmetros meteorológicos registados no local e nas estações permanentes pertencentes ao IPMA, localizadas no Observatório Afonso Chaves (AC) e no aeroporto (Aero) para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.	52
Tabela 3.2 - Coeficientes de correlação de Pearson das variáveis analisadas durante o período em estudo. (13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023) (AC – Estação meteorológica do Observatório Afonso Chaves; Aero – Estação meteorológica do aeroporto).....	54
Tabela 3.3 - Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.	55
Tabela 4.1 - Estatística descritiva dos dados de concentração de radão no ar interior de edifícios da área de estudo nas duas campanhas realizadas.....	75

Índice de Fotos

Foto 3.1 - Detetor de radão utilizado na monitorização contínua do local de amostragem definido.	47
Foto 4.1 - Detetor de radão utilizado na monitorização da qualidade do ar interior de edifícios.	72
Foto 4.2 - GPS portátil utilizado para registo de coordenadas.	72

Lista de Acrónimos

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CMHC – Canada Mortgage and Housing Corporation

EANR – European Atlas of Natural Radiation

EC – European Commission

US EPA – United States Environmental Protection Agency

IAEA – International Atomic Energy Agency

ICRP – International Commission on Radiological Protection

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

NCR – National Research Council

OMS – Organização Mundial de Saúde

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WHO – World Health Organization

Agradecimentos

A realização deste projeto não teria sido possível sem todo um conjunto de pessoas que me ajudaram e motivaram ao longo destes árduos meses de trabalho, as quais gostaria estou imensamente grata.

- Gostaria primeiro de agradecer imensamente à minha orientadora Doutora Catarina Paula Pacheco da Silva, pela sua disponibilidade, ajuda, apoio e partilha de conhecimentos que contribuíram para a execução deste trabalho;

- À minha outra orientadora Professora Doutora Maria de Fátima Batista Viveiros por ser uma excelente professora e me ter aceite como orientanda e contribuir para a escolha e realização deste trabalho;

- Ao Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA) pela cedência da imagem com a sismicidade atualizada até ao ano de 2023;

- À Universidade dos Açores e ao Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR) pelos meios concedidos para a realização do trabalho;

- Ao Rafael Santos pela sua disponibilidade, disposição e boa companhia na elaboração do trabalho de campo e pelos momentos partilhados com gargalhadas e boas conversas depois do dia de campo;

- Ao João Correia que apesar de distante esteve sempre pacientemente ao meu lado para me apoiar e ajudar nos bons e nos maus momentos, motivando-me para continuar;

- Ao Paulo e ao Bruno pela ajuda preciosa que me deram e pela solidariedade enquanto todos escrevíamos as respetivas dissertações de mestrado;

- Ao meu patrão, Paulo Barbosa, por me permitir ajustar o meu tempo de trabalho em simultâneo com a elaboração da dissertação;

- A todos não mencionados acima que contribuíram de alguma forma para este trabalho;

- E por fim, mas não menos importante, aos meus pais e irmã que me acompanharam em todo o processo de análise e escrita deste trabalho, pelo incentivo constante no desenvolvimento deste projeto, para seguir em frente e não desistir e por tudo o que me proporcionaram e continuam a proporcionar.

Resumo

O radão (^{222}Rn) é um gás radioativo, incolor e inodoro, sendo um subproduto natural do decaimento radioativo do urânio (^{238}U) e do rádio (^{226}Ra) presentes em rochas, solos e água. O estudo do radão é extremamente relevante tendo em conta que a exposição a este gás pode constituir um problema para a saúde humana, devido aos seus efeitos cancerígenos, nomeadamente ao nível do cancro do pulmão. Estudar o gás radão e o seu comportamento é crucial para entender a sua distribuição, risco de exposição e implementar estratégias eficazes de mitigação. Neste trabalho pretende-se compreender a distribuição espacial e variação temporal da concentração de radão no ar interior de edifícios localizados na cidade de Ponta Delgada e identificar possíveis implicações em termos de saúde pública. Para tal, foram selecionados vários edifícios desta cidade para realização de uma monitorização regular e um para a realização de um ensaio de monitorização contínua do radão no ar interior.

A cidade de Ponta Delgada encontra-se localizada no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, onde a sua superfície topográfica é intensamente marcada pela presença de vários cones de escórias sendo esta área coberta principalmente por fluxos de lava e piroclastos de composição basáltica (*s.l.*), embora em zonas sem atividade vulcânica recente também seja possível observar piroclastos de composição traquítica (*s.l.*), que provêm da atividade de vulcões centrais próximos. Atualmente, a área de estudo, não apresenta manifestações secundárias visíveis de vulcanismo.

No ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior, efetuados num edifício localizado na cidade de Ponta Delgada, foi aplicada a análise de regressão múltipla e a análise espectral às séries temporais de dados obtidas de forma a entender e filtrar a influência de fatores externos. Os valores de concentração de radão obtidos variaram entre 8 e 1851 Bq/m^3 , sendo os valores mais elevados registados nos meses de verão. No modelo proposto as variáveis com significância estatística são a humidade relativa, a temperatura e a pressão barométrica no ar interior, explicando 37,0% das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior do edifício. A análise espectral aplicada no local de amostragem permitiu a identificação de variações cíclicas diárias associadas a um e dois ciclos por dia. O espectrograma calculado confirmou estas variações cíclicas diárias permitindo, ainda, identificar a presença de variações sazonais. A temperatura no ar exterior e a velocidade do vento são as variáveis correlacionadas com a variação associada a um ciclo por dia da concentração de radão no ar interior deste edifício. Por seu lado, a pressão barométrica, a humidade relativa e a temperatura no ar exterior estão correlacionadas com a variação observada de dois ciclos por dia. A análise das baixas frequências permitiu reconhecer variações periódicas associadas a 341, 137 e 76 dias.

Para a monitorização regular da concentração de radão no ar interior de edifícios foram selecionados pontos de amostragem (edifícios) que permitissem cobrir todo o centro urbano da cidade de Ponta Delgada. Foram realizadas duas campanhas de amostragem, uma decorreu durante os meses de verão e outra durante os meses de inverno. A análise de distribuição espacial da concentração de radão no ar interior de edifícios permitiu constatar que os valores de concentração de radão medidos foram superiores na campanha realizada no verão quando comparados com os registados durante a campanha realizada no inverno. A média anual calculada da concentração de radão no ar interior dos edifícios da cidade de Ponta Delgada variou entre 23 e 576 Bq/m³. Cerca de 27% (7 dos 26 pontos amostrados) dos edifícios amostrados apresentam valores médios anuais de concentração de radão superiores ao limite previsto na legislação nacional (300 Bq/m³). A análise de distribuição espacial das médias anuais calculadas permitiu identificar duas áreas da cidade de Ponta Delgada onde os valores de concentração de radão no ar interior são superiores ao limite legislado.

A sazonalidade atípica observada quer no ensaio de monitorização contínua, quer na monitorização regular na qual os valores mais elevados foram registados nos meses de verão, vem reforçar a importância deste tipo de estudo para uma melhor compreensão da complexa variação temporal do radão no ar interior de edifícios. A presença de radão em concentrações acima do limite legislado em diversos dos edifícios monitorizados, reforça a importância deste tipo de estudo em regiões vulcânicas, mesmo em sistemas vulcânicos onde não se esperaria que a presença deste gás fosse significativa. Dado o potencial cancerígeno do radão, a realização de estudos como os aqui realizados é fundamental para melhor proteger as populações que a ele possam estar expostas.

Palavras-chave: Radão; saúde pública; monitorização contínua; monitorização regular; sazonalidade.

Abstract

Radon (^{222}Rn) is a radioactive, colourless and odourless gas, being a natural by-product of the radioactive decay of uranium (^{238}U) and radium (^{226}Ra) this gas is present in rocks, soils and water. The study of radon is extremely relevant considering that exposure to this gas can pose a problem to human health, due to its carcinogenic effects, particularly in terms of what concerns lung cancer. Studying radon gas and its behavior is crucial to understanding its distribution, risk of exposure and implementing effective mitigation strategies. The main goals of the current study are to understand the spatial and temporal variation of indoor radon concentration in the buildings located at Ponta Delgada city and to assess possible implications for public health. To fulfill this purpose, several buildings in the city were selected to perform indoor radon regular monitoring and one building was selected for carrying out a continuous monitoring assay.

The city of Ponta Delgada is located in the Picos Fissural Volcanic System, where its topographic surface is intensely marked by the presence of several scoria cones. This area is mainly covered by lava flows and pyroclasts of basaltic (*s. l.*) composition, although in areas without recent volcanic activity, it is possible to observe pyroclasts of trachytic (*s. l.*) composition, as result of the activity of the nearby central volcanoes. Currently, the study area does not present visible secondary manifestations of volcanism.

In the indoor radon continuous monitoring test, multiple regression analysis and spectral analysis were applied to the time series obtained to understand and filter the influence of external parameters. The radon concentration values varied between 8 e 1851 Bq/m³, and the highest values were recorded during the summer months. In the proposed model, the variables with statistical significance are air relative humidity, temperature and barometric pressure measured inside the building. These variables are able to explain 37,0% of the log-transformed indoor radon concentration variation. The spectral analysis applied at the sampling site allowed to identify daily variations associated with one and two cycles per day. The calculated spectrogram confirmed these daily cyclic variations, and allow to identify seasonal variations. The outdoor temperature and the wind speed are the variables correlated with one cycle per day variation of indoor radon concentration. The outdoor relative humidity, barometric pressure and temperature are the variables correlated with two cycles per day variation of the indoor radon concentration. The low frequencies analysis allows to recognize periodic variations associated with 341, 137 and 76 days.

Several sampling points (buildings) were selected, covering the entire urban center of Ponta Delgada city, to perform the indoor radon concentration regular monitoring. Two surveys were carried out, one during the summer months and one during the winter. The spatial

distribution analysis of the indoor radon concentration allowed to realize that the measured radon concentration values were higher in summer when compared to those observed in the winter survey. The calculated indoor radon concentration annual average varied between 23 and 576 Bq/m³. Around 27% (7 out of 26) of the sampled buildings presented annual averages above the national legislation limit (300 Bq/m³). The annual average spatial distribution analysis allowed to identify two areas in Ponta Delgada city where the indoor radon concentration values are above the Portuguese legislation limit.

The atypical seasonal variation observed both in the radon regular monitoring and in the continuous monitoring assay, with higher values measured during the summer months, reinforces the importance of these type of studies for a better understanding of indoor radon temporal variations. The presence of radon in concentrations above the legislated limit in several of the monitored building supports the relevance of this kind of study in volcanic regions, even in volcanic systems where the presence of this gas would not be expected to be significant. These studies are also essential to better protect the population that might be exposed to radon, given the carcinogenic potential of this gas.

Keywords: Radon; public health; continuous monitoring; regular monitoring; seasonality.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Nota prévia

O radão (^{222}Rn) é um gás radioativo, incolor e inodoro, sendo um subproduto natural do decaimento radioativo do urânio (^{238}U) e do rádio (^{226}Ra) presentes em rochas, solos e água. O estudo do radão é extremamente relevante tendo em conta que a exposição a este gás pode constituir um problema para a saúde humana, devido aos seus efeitos cancerígenos, nomeadamente ao nível do cancro do pulmão. Estudar o gás radão e o seu comportamento é crucial para entender a sua distribuição, risco de exposição e implementar estratégias eficazes de mitigação. O presente trabalho tem como objetivo principal conhecer a distribuição espacial do radão no ar interior de edifícios localizados na cidade de Ponta Delgada e reconhecer possíveis implicações para a saúde pública.

Uma das principais preocupações associadas ao radão é a sua acumulação em ambientes interiores. O radão presente nas rochas e nos solos pode infiltrar-se nos edifícios através de fissuras existentes nas paredes e no pavimento, podendo acumular-se em concentrações elevadas no ar interior. Como passamos uma quantidade significativa de tempo em ambientes fechados, estudar os níveis de radão nestes ambientes é crucial para avaliar os riscos de exposição (Darby, 2005).

Os níveis de concentração de radão podem variar significativamente de uma localização geográfica para outra devido a fatores ambientais (como por exemplo a pluviosidade, temperatura, humidade) e variações na geologia, como a composição do solo que depende de aspetos como a topografia, a disponibilidade hídrica, o clima e a rocha-mãe. Em regiões vulcânicas como os Açores, a presença deste gás pode variar significativamente dependendo das características geológicas do local (por exemplo: composição química das rochas e dos solos, presença de estruturas tectónicas, zonas de desgaseificação difusa). A realização de estudos detalhados sobre variações regionais nos níveis de radão é essencial para identificar áreas de alto risco e implementar medidas de mitigação direcionadas. Os levantamentos geológicos e análises geoespaciais podem fornecer informações valiosas sobre regiões mais propensas à emissão de radão, permitindo estratégias eficazes de gestão de riscos (Esan *et al.*, 2020; Nuhu *et al.*, 2021).

Compreender o comportamento e as fontes de emissão do gás radão é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação. Ao identificar essas fontes e implementar técnicas apropriadas de ventilação e eventual interdição, é possível reduzir as concentrações de radão para níveis seguros (NRC, 1999).

1.2 Radiação Natural

A radiação é um fenômeno complexo que existe em todo o mundo natural. Assim sendo, os seres humanos têm sido expostos a radiação natural ao longo de toda a sua existência e evolução. Essa exposição a radiação, emitida por fontes naturais, é inevitável e representa um fator permanente da vida cotidiana (EC, 2019).

A radiação natural na atmosfera surge principalmente de dois processos: i) da transformação atômica que ocorre nos núcleos da matéria do Universo e que atinge o planeta Terra através dos raios cósmicos provenientes do espaço e ii) da radiação terrestre, mais concretamente do decaimento de radionuclídeos presentes no solo e rochas da crosta terrestre. No primeiro caso, os raios cósmicos, vindos do espaço, bombardeiam o planeta Terra constantemente. Essas partículas altamente energéticas são predominantemente prótons e núcleos atômicos e a sua intensidade varia com fatores como a altitude e a atividade solar (Dorman, 2004). A radiação terrestre, por seu lado, surge a partir do decaimento dos radionuclídeos existentes nas rochas da crosta terrestre como o urânio (^{238}U), o tório (^{234}Th) e o potássio (^{40}K). Estes elementos ao decaírem, dão origem a isótopos também eles radioativos, emitindo radiação sob a forma de partículas α (alfa), β (beta) e/ou γ (gama). A radiação assim emitida representa cerca de 85% da dose média anual de radiação a que toda a população se encontra exposta (UNSCEAR, 2006). Essas fontes de radiação natural contribuem significativamente para a exposição dos seres humanos a radiação.

Existem dois tipos de radiação: ionizante e não ionizante. A radiação não ionizante, é, por definição, a radiação com energia insuficiente para ionizar átomos e moléculas. No entanto, tem energia suficiente para a excitação, o que eleva eletrões a estados de energia mais elevados. O aquecimento é o efeito mais comum da radiação não ionizante. Se este aquecimento for extremo causará danos nos tecidos, mas a baixa exposição a este tipo de radiação normalmente não causa problemas (Helmenstine, 2023). Alguns exemplos de radiação não ionizante, incluem ondas rádio, microondas e infravermelhos. A radiação ionizante é constituída pelas partículas libertadas nos processos de decaimento radioativo que ao interagirem com a matéria podem deslocar eletrões das suas órbitas atômicas, transformando átomos (eletricamente neutros) em iões. Por ter energia suficiente para ionizar átomos e romper ligações químicas, pode danificar ou matar células e alterar o DNA e outras moléculas (Ferreira & Coelho, 2006; WHO, 2023). Alguns exemplos deste tipo de radiação englobam raios-X, raios gama, partículas alfa e beta.

Acima de certos limites, a radiação pode prejudicar o funcionamento dos tecidos e/ou órgãos e pode produzir efeitos agudos como vermelhidão da pele, perda de cabelo, queimaduras por radiação ou síndrome de radiação aguda. Estes efeitos são mais graves quando há altas doses de radiação ionizante. Se a dose de radiação for baixa e/ou emitida durante um longo período (com taxa de dose de radiação baixa), o risco é substancialmente mais baixo porque há uma maior possibilidade de regenerar os possíveis danos. Ainda assim, o risco da exposição a longo prazo, poderá provocar cataratas ou cancro, que podem aparecer anos ou décadas mais tarde. Estas consequências podem nem sempre ocorrer, no entanto, a sua probabilidade é proporcional à dose de radiação emitida (WHO, 2023).

O radão (^{222}Rn), um gás radioativo, é um dos contribuintes significativos para a exposição a radiação natural. Como já mencionado, é um produto de decaimento do urânio (^{238}U) e do rádio (^{226}Ra), comumente encontrado em rochas, solo e águas subterrâneas. Este gás pode acumular-se em ambientes fechados, particularmente em espaços interiores mal ventilados, aumentando o risco de cancro do pulmão (NRC, 1999).

1.3 Radão (^{222}Rn)

Todos os materiais geológicos contêm pequenas quantidades de elementos químicos capazes de emitirem radioatividade natural. Alguns dos radionuclídeos presentes nas rochas podem contribuir significativamente para a radioatividade atmosférica, devido à formação de gases que podem ser exalados pela superfície terrestre. Estes gases, o radão (^{222}Rn), o torão (^{220}Rn) e o actinão (^{219}Rn) são descendentes diretos do rádio-226 (^{226}Ra), do rádio-224 (^{224}Ra) e do rádio-223 (^{223}Ra), respetivamente, e resultam das séries de decaimento radioativas do urânio-238 (^{238}U), do tório-232 (^{232}Th) e do urânio-235 (^{235}U), respetivamente (Figura 1.1) (Ferreira & Coelho, 2006; Carvalho, 2009).

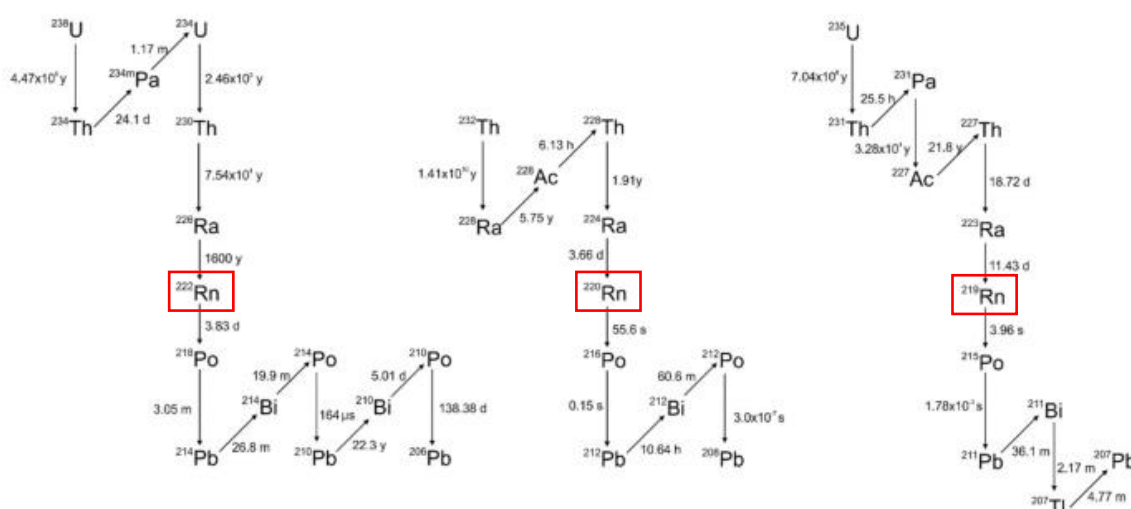


Figura 1.1 - Séries de decaimento do urânio-238, tório-232 e urânio-235. As setas verticais indicam o decaimento com emissão de partículas alfa e as setas diagonais indicam o decaimento com emissão de partículas beta. Para os radionuclídeos que têm mais de um modo de decaimento, apenas o que ocorre com mais frequência é representado. A vermelho encontra-se assinaladas as posições do ^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn (modificado de Kölbl *et al.*, 2020).

Dos vários isótopos do radão existentes na natureza, o ^{222}Rn é o mais relevante no contexto deste trabalho, pois é mais abundante na natureza e tem um tempo de semi-vida superior ao dos seus isótopos, pelo que é o que mais facilmente se consegue acumular no ar interior de edifícios. Por outro lado, os métodos para a sua deteção são práticos e económicos (Silva, 2013 e referências nele citadas). Assim, qualquer referência genérica ao radão, ao longo deste trabalho, refere-se ao isótopo ^{222}Rn .

O radão pode ser descrito como um gás radioativo, inerte, incolor e inodoro, com um tempo de semi-vida de 3,82 dias e que ao decair liberta do núcleo uma partícula alfa (α) transformando-se no elemento seguinte da cadeia. Este gás é utilizado em diversos estudos ambientais e também é importante na investigação da atividade vulcânica e de fenómenos que ocorrem em profundidade, sendo a sua deteção apenas possível através da utilização de equipamento específico (e.g., Appleton, 2005; Čeliković *et al.*, 2022).

O radão, sendo um gás inerte, não consegue estabelecer ligações químicas, o que lhe permite deslocar-se livremente através do material geológico permeável e dos poros do solo ou ser transportado pela água e/ou por outros gases presentes em profundidade, podendo, subsequentemente, ser deslocado para o ar interior de algum edifício ou para o ar atmosférico (Spencer, 1992; Ciolini & Mazed, 2010).

A radioatividade emitida pela partícula alfa libertada é expressa, no Sistema Internacional, em becquerel por metro cúbico (Bq/m³), onde 1 Bq/m³ corresponde à desintegração de um átomo de radão por segundo por metro cúbico de ar (Spencer, 1992).

1.4 Radão e Saúde

De entre os isótopos radioativos que contribuem para a radiação natural, o radão é o que representa maior risco para a saúde humana, contribuindo com cerca de 55% da radiação anual a que a população em geral está exposta (Omenka & Raymond, 2022).

Da radiação emitida (alfa, beta e gama), as partículas alfa são as que representam maior perigo, visto serem as maiores e as mais energéticas, podendo penetrar nos tecidos e danificar as células próximas das superfícies das vias respiratórias (Hasbrouck, 1983). As partículas alfa podem penetrar nos tecidos epiteliais pulmonares e causar danos e mutações celulares. Estas partículas, ao removerem elétrons das moléculas, especificamente de RNA e DNA, podem afetar a informação contida nestas moléculas e a divisão celular, podendo provocar mutações nos cromossomas (Gao *et al.*, 2008).

Os produtos resultantes do decaimento do radão poderão também eles ser depositados nas células que revestem as vias aéreas dos pulmões, onde as partículas alfa emitidas quer pelo radão, quer pelos elementos seguintes da cadeia de decaimento do ²³⁸U, poderão danificar o DNA das células pulmonares, e eventualmente de outros órgãos e tecidos, com potencial risco (Omenka & Raymond, 2022). Alguns elementos desta cadeia de decaimento, poderão passar dos pulmões para o sangue e poderão irradiar para todo o corpo humano. (Yu *et al.*, 2006).

Os efeitos nocivos do radão e dos seus produtos de decaimento, estão bem documentados e comprovados em estudos realizados em mineiros que exerceram a sua atividade profissional em minas de urânio. Existem vários estudos epidemiológicos que acompanham o estado de saúde de grandes populações mineiras, demonstrando claramente a relação entre a exposição ao radão e a incidência de cancro do pulmão (Frumkin & Samet, 2001; Yu *et al.*, 2006). Mais recentemente, também foram efetuados estudos epidemiológicos em populações que vivem em regiões com níveis de radão elevados, como é o caso dos estudos realizados em

França, Reino Unido e Estados Unidos da América que concluíram que o principal risco resultante da exposição prolongada a altas concentrações de radão é o aumento da probabilidade de contrair cancro do pulmão (Carvalho, 2009).

São vários os estudos que se têm dedicado a estimar o número de casos de cancro do pulmão induzido pelo radão e os evitados por uma ação de remediação ou preventiva. De entre estes destacam-se dois métodos de análise distintos. O primeiro corresponde ao estudo europeu elaborado por Darby *et al.* (2004), indicando que o risco de cancro do pulmão aumenta em 16% por aumento de 100 Bq/m³ na concentração média habitual ou de longo prazo de radão no edifício (Krewski *et al.*, 2005; WHO, 2009). O segundo, por sua vez, corresponde ao modelo de risco proposto pelo *Committee on Health Risks of Exposure to Radon* (BEIR VI), com base em dados de mineiros, nos quais a taxa de mortalidade por cancro do pulmão variou linearmente com a exposição cumulativa ao radão, tendo em conta a idade, tempo de exposição, tempo passado após a exposição e a concentração de radão (NRC, 1999; WHO, 2009).

Como resultado dos vários estudos epidemiológicos efetuados, a Organização Mundial de Saúde (OMS) classificou o radão como um elemento carcinogénico do Grupo 1, e como sendo a segunda principal causa de cancro no pulmão a seguir ao consumo do tabaco (WHO, 2009).

A exposição a este gás é responsável por cerca de 21.000 mortes por cancro do pulmão anualmente apenas nos Estados Unidos da América (USEPA, 2021). Combinando estes dois elementos, ou seja, fumadores expostos a elevadas concentrações de radão, o risco de ter cancro no pulmão é cerca de 10 a 20 vezes superior (Tabela 1.1) (Jones, 1999; Williams-Jones & Reymer, 2000). A OMS destacou a necessidade urgente de pesquisa e compreensão desta substância perigosa.

Tabela 1.1 - Risco de contrair cancro do pulmão devido à exposição ao radão em fumadores e em não fumadores (modificado de USEPA, 2009a; 2009b, *in*: Silva, 2013).

Concentração de radão (exposição durante toda a vida)	Se 1000 pessoas fumadoras estiverem expostas a esta concentração de radão...	Se 1000 pessoas não fumadoras estiverem expostas a esta concentração de radão...
740 Bq/m ³	Cerca de 260 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 36 podem desenvolver cancro no pulmão
370 Bq/m ³	Cerca de 150 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 18 podem desenvolver cancro no pulmão
296 Bq/m ³	Cerca de 120 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 15 podem desenvolver cancro no pulmão
148 Bq/m ³	Cerca de 62 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 7 podem desenvolver cancro no pulmão
74 Bq/m ³	Cerca de 32 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 4 podem desenvolver cancro no pulmão
48 Bq/m ³	Cerca de 20 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 2 podem desenvolver cancro no pulmão

A OMS recomenda estabelecer um nível de referência nacional de exposição ao radão o mais baixo possível. Tendo em conta os dados científicos sobre os efeitos do radão para a saúde em ambientes fechados, justifica-se um nível de referência de 100 Bq/m³ do ponto de vista da saúde pública, porque se espera uma redução eficaz dos riscos para a saúde associados ao radão para uma população. No entanto, se este nível não puder ser implementado nas condições específicas prevalentes do país, o nível de referência escolhido não deverá exceder 300 Bq/m³ (WHO, 2009). A decisão de estabelecer um nível de referência nacional necessita de aplicar o processo de otimização, tendo em conta as circunstâncias económicas e sociais prevalentes (ICRP, 2008).

Em Portugal, o Decreto-Lei 108/2018, veio fornecer um novo enquadramento na questão do radão, no que diz respeito à proteção do público e dos trabalhadores, deixando este gás de ser apenas mais um parâmetro a monitorizar no âmbito da qualidade do ar interior. O Decreto-Lei estipula um novo nível de referência nacional para a concentração média anual da atividade de radão no ar, o que não deve exceder 300 Bq/m³ em habitações e outros edifícios como locais de trabalho, assim como em lugares com grande ocupação de membros do público.

1.5 Radão em Edifícios

1.5.1 Fontes de Radão nos Edifícios

O radão que se acumula no ar interior de edifícios pode ser proveniente de três fontes distintas: o solo, o material de construção e a água que abastece o edifício. A emissão de radão a partir do solo é sem dúvida a mais importante contribuindo em média, com cerca de 95% do total da concentração de radão acumulada no ar interior de edifícios. Segue-se a emissão de radão através dos materiais de construção, que contribuem com cerca de 5% e finalmente da água que abastece o edifício, cuja contribuição é inferior a 1% (Figura 1.2) (Neves & Pereira, 2004). Em casos específicos, a contribuição das duas últimas fontes mencionadas pode ser significativamente superior devido, por exemplo, a materiais de construção com elevados teores em urânio e a utilização de águas subterrâneas ricas em radão. De acordo com vários estudos (Ruano-Ravira *et al.*, 2002; García *et al.*, 2011), estima-se que essa contribuição possa oscilar entre 15% e 20% do total acumulado, representando uma quantidade de aproximadamente de 10 Bq/m³ a 20 Bq/m³, o que não representa uma exposição relevante como fonte isolada, embora contribua para a soma total da concentração de gás no ar interior.

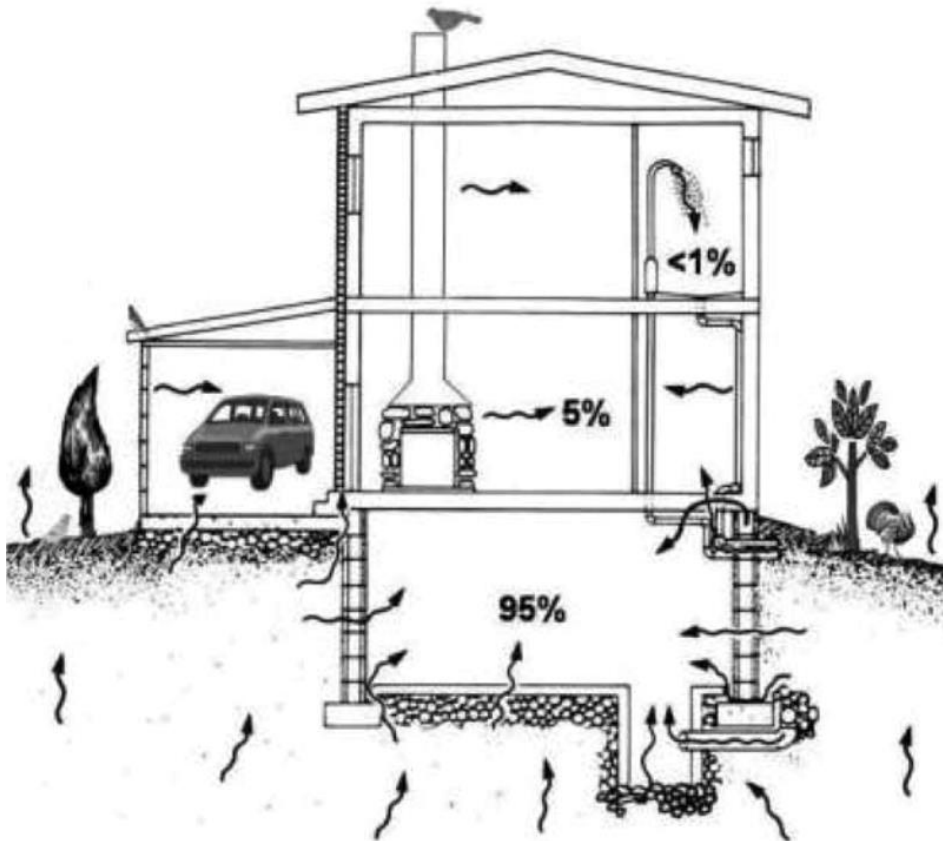


Figura 1.2 - Contribuição das diversas fontes para o nível de radão nos edifícios (Neves & Pereira, 2004).

1.5.1.1 Radão no Solo

Como mencionado anteriormente, o radão (^{222}Rn) é um gás radioativo que se forma a partir do decaimento natural do urânio-238 (^{238}U). Uma vez que o ^{238}U ocorre em solos e em rochas que estão distribuídas por todo o planeta Terra, a exposição ao radão é universal. O radão está presente não apenas em ambientes fechados, mas também ao ar livre. A acumulação de radão em edifícios é em grande parte resultado do radão que é emitido através dos solos. Este torna-se um poluente incomum do ar interior, pois é proveniente de uma fonte natural (Frumkin & Samet, 2001). O radão escapa do solo para o ar exterior e é normalmente diluído para baixas concentrações, não representando uma preocupação. No entanto, o radão que entra num espaço fechado, como um edifício, por exemplo, pode acumular-se em níveis elevados (CMHC, 1997). Dependendo da geologia do local, qualquer habitação pode ter níveis elevados de radão, pois este sendo gasoso pode exalar do solo para o interior de edifícios, através de fendas, canalizações, juntas do pavimento e infraestruturas de drenagem, devido aos gradientes de pressão provocados pelos diferenciais de temperatura, por exemplo. O radão tende a acumular-se nas zonas mais baixas, como caves e pisos térreos (Figura 1.3), pois é cerca de 8 vezes mais denso do que o ar. A concentração de radão tem tendência a diminuir consideravelmente a partir do segundo piso acima do rés-do-chão (em condições de pressão e temperatura normais), igualando-se aos valores encontrados no ar atmosférico (Ferreira & Coelho, 2006).

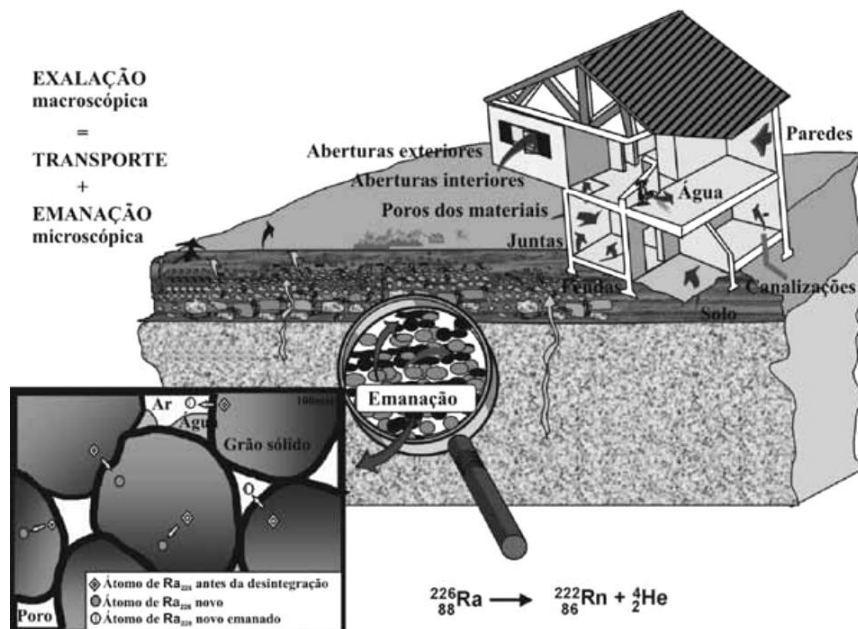


Figura 1.3 - Vias de penetração do radão nos edifícios (Robé, 2004, *in*: Ferreira & Coelho, 2006).

A concentração de radão no ar interior de edifícios é controlada, de modo geral, pela concentração de radão no solo, que é comumente considerado como estando principalmente relacionado com a quantidade de urânio presente nas rochas e solos (radão geogénico). O radão geogénico é geralmente quantificado pelo potencial de radão geogénico que representa o que o “planeta Terra oferece” em termos de radão disponível para entrar em edifícios e pode ser considerado como um indicador da suscetibilidade de uma área ao radão geogénico (Figura 1.4) (Gruber *et al.*, 2013; Petermann *et al.*, 2021; Benà *et al.*, 2022).

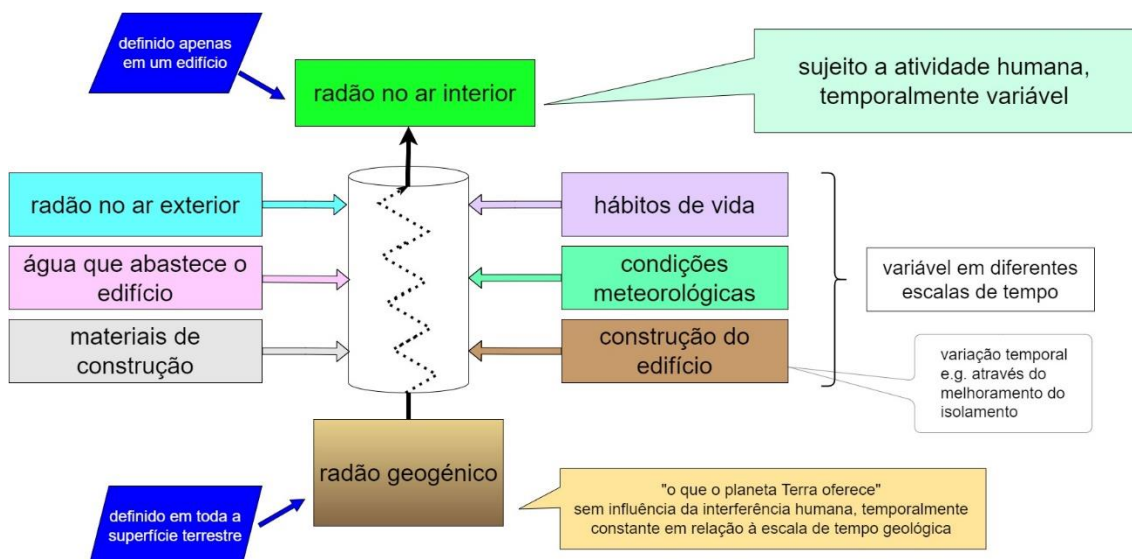


Figura 1.4 - Fatores que interferem com a concentração de radão no ar interior (adaptado de Gruber *et al.*, 2013).

O processo de ascensão do radão das rochas e dos solos até à superfície terrestre engloba três fases distintas: emanação, migração e exalação. A emanação corresponde ao processo de libertação dos átomos de radão dos grãos minerais das rochas e dos solos para os espaços intersticiais, a migração corresponde ao transporte do radão até à superfície terrestre e finalmente a exalação corresponde à passagem deste gás para a atmosfera ou para o ar interior dos edifícios (Wiegand, 2001).

As concentrações elevadas de radão no solo estão normalmente relacionadas com a geologia local, mais precisamente o tipo de rochas presentes (tabela 1.2 e 1.3), sendo que a sua libertação do solo e/ou das rochas é condicionada pelos constituintes minerais existentes, onde o urânio e o rádio se encontram alojados (Appleton, 2005; Bossew & Lettner, 2007).

Tabela 1.2 - Concentração de urânio em rochas e minerais (modificado de Wiegand, 2001)

Rocha/Mineral	Concentração Urânio (ppm)
Basalto	0,8
Granito	4,4
Plagioclase	2,5
Micas	20

Tabela 1.3 - Concentração de ^{238}U em rochas magmáticas (modificado de Wiegand, 2001, *in*: Silva, 2013)

Tipos de Rochas Magmáticas	Concentração de ^{238}U (Bq/Kg)	
	Média	Mínimo - Máximo
Rochas Ácidas	44	38 - 250
Rochas Intermédias	19	13 - 100
Rochas Básicas	11	4 - 13
Rochas Ultra-básicas	1	0,1 - 1

Quando um átomo de rádio decai, é ejetado do seu núcleo uma partícula alfa composta por dois neutrões e dois prótons, transformando-se no elemento seguinte da cadeia de decaimento, o radão. O novo formado átomo de radão, sofre um recuo causado pela energia cinética presente na partícula alfa que é suficiente para provocar movimento do átomo de radão no sentido oposto (Spencer, 1992). A localização do átomo de rádio no grão mineral e a direção de recuo do átomo de radão (seja em direção à superfície ou ao interior do grão) determinam, ou não, se o novo átomo formado entra no espaço poroso entre os grãos minerais. Se um átomo de rádio está localizado no interior de um grão de grande dimensão, então, independentemente da direção de recuo, não libertará o átomo de radão do grão, permanecendo no interior do mesmo. Mesmo quando um átomo de rádio está próximo do limite de um grão, o recuo enviará o átomo de radão para uma zona mais interior do mineral se a direção de recuo for para o núcleo do grão. No entanto, o recuo de alguns átomos de radão é direcionado para o limite do grão, fazendo com que o novo átomo saia do mineral e entre no espaço poroso entre os grãos ou fraturas nas rochas ocorrendo assim a emanção do radão (Figura 1.5) (Otton, 1992). Em alguns materiais, como por exemplo argila, o radão que não é desalojado por recuo, fica vagamente preso na estrutura molecular do mineral e pode movimentar-se sem a ajuda do recuo. Este processo mais gradual de deslocação é conhecido como difusão, significando que os átomos de radão são emanados de materiais geológicos por difusão ou por recuo (Spencer, 1992).

A fração de átomos libertados designa-se por coeficiente de emanção de radão e depende de fatores como a densidade, a permeabilidade, a porosidade, o tamanho e a forma dos grãos, a distribuição do rádio no grão mineral, o teor de água no solo e as variações de parâmetros meteorológicos (Greeman & Rose, 1995; Schumann & Gundersen, 1996).

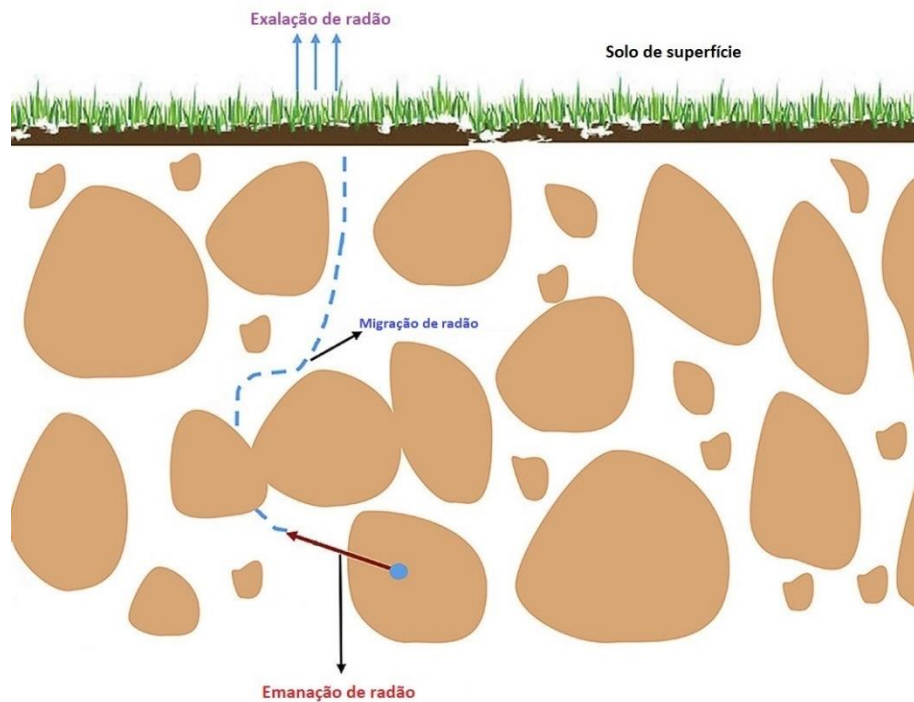


Figura 1.5 - Representação esquemática do processo de emissão do radão através dos solos (modificado de Phong *et al.*, 2020).

A migração do radão, tal como o transporte de gases no solo, deve-se a dois tipos de campos de força: gradientes de pressão e gradientes de concentração. Quando a mobilidade de gases é instigada por um gradiente de concentração, designa-se por difusão. Aqui, o gás movimenta-se, em todas as direções, de zonas de maior concentração para as zonas de menor concentração, de modo que a sua concentração nas rochas e/ou no solo se distribua uniformemente (Etiopie e Martinelli, 2002).

Por outro lado, quando a movimentação de gases é resultante de um gradiente de pressão, ocorre um transporte efetuado por advecção, passando o gás a mover-se das zonas de maior pressão para as zonas de menor pressão. Quando o movimento advectivo é produzido por um gradiente geotérmico, este tipo de transporte designa-se por convecção (Etiopie & Martinelli, 2002).

Dado que, estes dois processos muito raramente ocorrem isolados na natureza, a movimentação de um certo gás resulta da combinação dos dois. Enquanto o gradiente de pressão assume um grande relevo em zonas com rochas muito fraturadas ou porosas, a difusão assume uma função importante em espaços capilares e rochas com poros pequenos. Na verdade, constata-se que quando o transporte por advecção existe, o transporte por difusão pode ser desprezado (Etiopie e Martinelli, 2002).

Para o radão, é preciso ter em atenção no seu transporte, não só as leis que gerem os transportes de gases, como também o seu decaimento radioativo. Por outro lado, o radão está normalmente presente no solo em pequenas quantidades (10^{-10} ppm), e é necessário ter em consideração a existência de outros gases presentes em maiores quantidades (ex. CO_2) que ajudarão a transportar o radão até à superfície, através dos gradientes de pressão, funcionando como gases de transporte ou arraste (Etiopé & Martinelli, 2002). A presença destes gases de arraste pode ser particularmente relevante em regiões vulcânicas como é o caso da área de estudo do presente trabalho.

Em regiões vulcânicas a emissão de gases pode-se manifestar à superfície de dois modos distintos: i) em zonas bem definidas e facilmente identificadas como fumarolas e plumas ou ii) pode ocorrer de modo difuso, de forma impercetível e apenas identificável através da utilização de equipamento específico, como é o caso da emissão de gases através dos solos. Estes dois tipos de emissão de gases são bastante comuns em vulcões ativos, podendo ocorrer mesmo em fases de dormência dos vulcões (Williams-Jones & Rymer, 2000).

Num sistema vulcânico, os gases libertados de modo difuso, em locais sem anomalia térmica, são normalmente CO_2 , ^{222}Rn , He e H_2 . Contrariamente, os gases libertados ao nível da cratera são geralmente o vapor de água (H_2O) e o CO_2 associados a gases reativos como o SO_2 e o HCl (Baubron *et al.*, 1991; Williams-Jones *et al.*, 2000; Silva, 2013).

A desgaseificação difusa de radão desempenha um papel importante na compreensão dos processos geodinâmicos e de monitorização ambiental, podendo ocorrer em diversos ambientes geológicos, incluindo áreas vulcânicas, zonas de falha e áreas com altas concentrações de rochas ricas em urânio (Otton, 1992; Nuhu *et al.*, 2021). Em regiões vulcânicas, variações na concentração de radão foram observadas antes e durante o início de eventos sísmicos regionais e relacionados com atividade sismovulcânica. Através da análise de dados da medição contínua de radão no solo em um dos flancos do vulcão Etna, Alparone *et al.* (2005) verificou um incremento da emissão de radão antes da ocorrência da erupção vulcânica de 1998. Revendo e correlacionando algumas características comuns observadas nos dados existentes das fases iniciais de erupções vulcânicas de quatro diferentes vulcões na América do Norte e Central, Segovia & Mena (1999) conseguiram encontrar informação que demonstra o vínculo que existe entre a concentração de radão e a fase inicial das erupções vulcânicas. No Havaí, Estados Unidos da América, anomalias positivas nas emissões de radão foram associadas a mudanças na atividade vulcânica (Thomas *et al.*, 1986). Além disso, no Vesúvio, em Itália, Cigolini *et al.* (2001) discriminaram anomalias de radão devido a sismos na região relacionados com atividade sismovulcânica. Também, Zimmer e Erzinger (2003) mostraram uma correlação positiva entre as emissões de radão, a pressão atmosférica e o conteúdo de água durante a

monitorização contínua de fumarolas de alta temperatura no vulcão Merapi, Indonésia. Recentemente, no vulcão Campi Flegrei, a concentração de radão no solo também foi utilizada como um indicador da evolução de uma crise vulcânica numa fase de reativação do sistema, caracterizada pela deformação crustal, sismicidade, e alterações na composição dos fluidos vulcânico-hidrotermais, nomeadamente ao nível das fumarolas e desgaseificação de CO₂ (Sabbarese *et al.*, 2020). Ainda, vários estudos foram realizados sobre as emissões de radão no solo no Monte Etna (Alparone *et al.* 2005; Morelli *et al.*, 2006, 2011; Neri *et al.*, 2006, 2007, 2011, 2016; Giammanco *et al.*, 2007; Burton *et al.*, 2004; Immè *et al.*, 2006a, 2006b; La Delfa *et al.*, 2007; Bonforte *et al.*, 2013; Johnová *et al.*, 2014), permitindo demonstrar a relação existente entre a concentração de radão no solo e a atividade geodinâmica do vulcão, ajudando a definir as fontes de radão presentes e os mecanismos para a sua emissão à superfície, assim como a explorar as causas das variações temporais nas taxas de emissão de radão no solo.

A desgaseificação difusa de determinado gás não se manifesta de modo uniforme em um sistema vulcânico, estando a sua presença à superfície terrestre, condicionada pela existência de zonas com maior permeabilidade, como zonas de falha, que correspondem a zonas preferenciais para a ascensão de gases existentes em zonas mais profundas até à superfície. No caso do radão, a geomorfologia e o tipo de rochas existentes irão, igualmente, condicionar o transporte e/ou a concentração de gases até à superfície (Silva, 2013). Por outro lado, as variações de parâmetros meteorológicos como a temperatura do ar, a pressão barométrica, precipitação, direção e velocidade do vento, influenciam também a exalação de radão à superfície terrestre (Coutinho, 2000; Silva *et al.*, 2014b, 2015; Silva & Viveiros, 2017).

1.5.1.2 Radão nos Materiais de Construção

Os radionuclídeos das séries de decaimento radioativas naturais do ²³⁸U, do ²³²Th e do isótopo radioativo ⁴⁰K estão presentes nas rochas e nos solos e por sua vez no ar atmosférico. As concentrações médias mundiais destes radionuclídeos (²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K) na crosta terrestre são cerca de 40 Bq kg⁻¹, 40 Bq kg⁻¹ e 400 Bq kg⁻¹, respetivamente (EC, 1999). Assim sendo, os materiais obtidos da crosta terrestre e utilizados em materiais de construção podem ser potenciais fontes de emissão de radão para o ar interior em residências, locais de trabalho e edifícios industriais. Do ponto de vista radiológico, material de construção significa, qualquer produto de construção para incorporação de forma permanente em um edifício, ou partes dele, e cujo seu comportamento afeta o desempenho do edifício em relação à exposição dos seus ocupantes à radiação ionizante, conforme definido na Diretiva 2013/59/Euratom.

A exposição à radiação devido aos materiais de construção pode ser dividida em exposição externa e interna, sendo a externa provocada por radiação gama direta e a interna devido aos produtos de decaimento de curta duração do radão que são emitidos dos materiais de construção para o ar interior. A exposição da população à radiação pode ser maior devido ao uso de materiais de construção que contêm níveis de radionuclídeos acima do normal (Madruga *et al.*, 2019).

O radão sendo um gás inerte, consegue mover-se livremente através de meios porosos, como em certos tipos de materiais de construção, embora geralmente apenas uma fração do que é produzido no material atinja a superfície e se consiga libertar passando para o ar interior do edifício. De uma forma geral, a maior parte do radão presente no ar interior nos pisos superiores de um edifício provém de materiais de construção. O excesso típico da concentração de radão no ar interior devido aos materiais de construção é de cerca de 10-20 Bq/m³, mas em algumas zonas, em situações excecionais, pode aumentar para mais de 1000 Bq/m³ (EC, 2000). Apesar de normalmente a concentração de radão emitida pelos materiais de construção ser baixa, ainda contribui para o somatório total de radão que entra para o ar interior. No entanto, esta contribuição dos materiais de construção para a soma dos valores de radão no ar interior pode ser negligenciada em zonas com elevadas emissões de radão através do solo.

Na tabela 1.4 expõe-se um resumo dos resultados de um estudo efetuado pela Comissão Europeia (EC, 1999) sobre a radioatividade de materiais de construção na União Europeia e na tabela 1.5 apresenta-se uma lista dos materiais de construção que suscitam preocupação do ponto de vista da proteção radiológica, de acordo com o artigo n.º 154 do Decreto-Lei n.º 108/2018.

Tabela 1.4 - Concentrações de atividades típicas e máximas em materiais de construção comuns e subprodutos industriais utilizados em materiais de construção na União Europeia. As concentrações típicas são médias nacionais ponderadas pela população de diferentes Estados-Membros. O máximo das concentrações são valores máximos relatados em EC, 1999 (retirado de EC, 1999).

Material	Concentração com atividade típica (Bq/kg)			Concentração com atividade máxima (Bq/kg)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Materiais de construção mais comuns (pode incluir subprodutos)						
Betão	40	30	400	240	190	1600
Betão armado e leve	60	40	430	2600	190	1600
Tijolos de argila (vermelha)	50	50	670	200	200	2000
Tijolos sílico-calcários	10	10	330	25	30	700
Rochas naturais para construção	60	60	640	500	310	4000
Gesso natural	10	10	80	70	100	200
Subprodutos industriais mais comuns usados em materiais de construção						
Gesso (subproduto) (Fosfogesso)	390	20	60	1100	160	300
Escória de alto forno	270	70	240	2100	340	1000
Cinza volante de carvão	180	100	650	1100	300	1500

Tabela 1.5 - Lista dos materiais de construção que suscitam preocupação do ponto de vista da proteção radiológica, de acordo com o artigo n.º 154 do Decreto-Lei n.º 108/2018 (APA, s.d.).

Materiais naturais	Materiais que incorporam resíduos de indústrias que processam material radioativo	Outros identificados pela autoridade competente
Xisto-aluminoso	Cinzas volantes	Gessos decorrentes de sistemas de lavagem de filtros de gases de combustão pelo método calcário-gesso (via húmida)
Materiais ou aditivos de origem ígnea, tais como: Granitoides, tais como granito, sienito e ortognaisse Pórfiros Tufo Pozolana, nomeadamente cinzas pozolânicas Lava	Fosfogesso	
	Escórias com fósforo	
	Escórias de estanho	
	Escórias de cobre	
	Lama vermelha, nomeadamente resíduo da produção de alumínio	
	Resíduos da produção de aço	

Assim, os materiais de construção normalmente não são por si só uma fonte de exposição determinante a concentrações perigosas de radão, embora, combinado com outros fatores, como localização geográfica, as condições atmosféricas e/ou as condições de ventilação, podem contribuir para aumentar a concentração do radão no ar interior (Sánchez, 2017).

1.5.1.3 Radão na Água

Uma terceira fonte de entrada de radão no ar interior de edifícios é a partir da água que abastece o mesmo, constituindo uma fonte secundária importante de exposição ao radão em zonas dependentes das águas subterrâneas. A água proveniente das torneiras e que abastece um edifício pode levar a uma exposição de radão pela ingestão da água potável e pela inalação do radão que é libertado quando a água é utilizada em tarefas domésticas como por exemplo, tomar banho, cozinhar e efetuar limpezas (UNSCEAR, 2000; Ademola & Ojeniran, 2017). Embora tanto a inalação do radão libertado pela água quanto a ingestão da mesma rica em radão possam representar alguma exposição para os pulmões e estômago, respetivamente, acredita-se que a inalação representa um risco maior para a saúde (NRC, 1999).

Porém, nos casos em que quantidades significativas de radão são transportadas para o interior da habitação pela água de um poço ou de um aquífero, o radão é libertado no ar interior, quando a água é usada para diferentes atividades domésticas (USEPA, 2012).

Segundo Partridge *et al.* (1979), quando águas subterrâneas com alto teor de radão são utilizadas em atividades domésticas como lavar a roupa, lavar a louça, usar o lavatório e tomar

banho podem conduzir à libertação de 28-98% do radão dissolvido na água. Esta utilização de água rica em radão promove uma exposição de curta duração ao radão que pode não ser tida em conta nas medições efetuadas durante vários dias em um edifício (Vinson *et al.*, 2008).

É mais provável notar-se a presença de radão na água quando a sua origem provém da água subterrânea, como por exemplo um sistema público de abastecimento de água que utiliza água subterrânea ou de um poço privado, visto que, nestes casos a água pode estar em contato com urânio que se encontra naturalmente presente nos solos e/ou rochas, não sendo normalmente um problema quando a sua origem deriva das águas superficiais que escorrem livremente sobre o terreno (APA, 2020). Adicionalmente, a concentração de radão em águas subterrâneas depende de vários fatores relacionados com as características geológicas do local, zonas fraturadas ou presença de falhas, a porosidade e as quantidades de urânio (^{238}U) e rádio (^{226}Ra) das rochas e também relacionados com fatores meteorológicos como a pressão atmosférica e a precipitação (Bonotto & Padron-Armada, 2008). Para além disso, as características da própria água, como a temperatura, a quantidade, a velocidade de circulação, o pH, a própria composição da água e o tempo de permanência em contato direto com a rocha, também afetam a concentração de radão nas águas subterrâneas (Choubey *et al.*, 2000; Hernández *et al.*, 2004).

1.5.2 Fatores Externos que Influenciam a Concentração de Radão no Ar Interior

Os níveis de concentração de radão em um edifício variam dependendo de fatores meteorológicos, como a pressão atmosférica, a velocidade do vento, a humidade relativa e a temperatura do ar (Ramola *et al.*, 2000; Papaefthymiou *et al.*, 2003; Silva & Viveiros, 2020). Dependendo das estações do ano a concentração de radão no ar interior poderá apresentar variações, com concentrações mais elevadas normalmente durante o inverno (Karpińska *et al.*, 2004; Bossew & Lettner, 2007; Silva & Viveiros, 2020). Uma das razões pelas quais a concentração de radão no ar interior é mais elevada no inverno é porque nesta estação do ano, os pontos de ventilação com o exterior, como portas e janelas, encontram-se geralmente fechadas, o que resulta no aumento da concentração de radão em locais fechados (Bossew & Lettner, 2007). A troca de ar entre o interior e o exterior dos edifícios é um fator importante que influencia a concentração do radão (Porstendorfer *et al.*, 1994; Gallelli *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2014b).

A passagem de radão do solo para o interior de edifícios é controlada por muitos fatores físicos e meteorológicos, relacionados com o ambiente, a construção do edifício e o tipo de

ventilação existente (Andersen *et al.*, 1994; Kesikuru *et al.*, 2001). As variações das temperaturas externa e interna resultam na diferença de densidade do ar e da pressão em relação ao ar dentro e fora do edificado. A diferença entre a pressão interna e externa é a principal razão que causa o fluxo de ar entre o interior e o exterior do edifício (Hubbard *et al.*, 1992). Outro fator importante que influencia a concentração de radão nos edifícios é o microclima, ou seja, a temperatura, a pluviosidade, a humidade interna e a taxa de renovação do ar (Akbari *et al.*, 2013).

As relações entre as concentrações de radão no ar interior e os parâmetros meteorológicos têm sido objeto de estudo de diversos trabalhos e variados resultados foram reportados. Tal como referido, na maioria dos casos, os níveis mais elevados de radão no ar interior foram observados no inverno, quando a temperatura externa estava baixa (Papaefthymiou *et al.*, 2003; Shaikh *et al.*, 2003; Denman *et al.*, 2007; Xie *et al.*, 2015). Contudo, alguns estudos observaram o oposto, concentrações elevadas de radão no período quente do ano (Hubbard *et al.*, 1992). Hubbard *et al.* (1992), por exemplo, estudaram o efeito da temperatura externa na concentração de radão em duas residências e descobriram que a concentração de radão no ar interior aumentou com o aumento da temperatura exterior. Isso foi explicado pelo efeito da ventilação que era dominante naquela habitação durante o período de inverno (Hubbard *et al.*, 1992). Kitto (2005) relatou que os níveis diurnos de radão no ar interior de uma casa unifamiliar, foram influenciados principalmente pela diferença entre a temperatura exterior e interior. Havendo, no entanto, pouca correlação encontrada entre as concentrações de radão no ar interior com a pressão barométrica e a velocidade do vento (Kitto, 2005).

Com vista a uma melhoria do desempenho energético, nos últimos anos, tem-se notado uma crescente adaptação dos edifícios. A construção de edificado energeticamente eficiente pode resultar numa diminuição da taxa de troca de ar comparativamente ao edificado existente. Ao melhorar a eficiência térmica de um edifício, a temperatura mais elevada do ar interior pode dar origem à diminuição da pressão dentro do mesmo, podendo levar a um aumento do fluxo de radão do solo para o interior do edifício e a sua consequente acumulação (IAEA, 2015; Du *et al.*, 2019).

Xie *et al.* (2015) verificaram que os níveis de radão em ambientes internos foram influenciados principalmente pela diferença de pressão barométrica interior/exterior em um edifício de dois andares (coeficiente de correlação $R = 0,67$). Aquilina & Fenech (2019) estudaram a influência de vários parâmetros meteorológicos nos níveis de radão no ar interior, em quatro locais diferentes nas ilhas maltesas, e descobriram que os níveis de radão no ar interior dependiam principalmente da humidade relativa do ar no exterior e da velocidade do vento. A maioria dos estudos sobre os valores de radão em ambientes fechados e as suas

variações sazonais foram realizados em residências (Francisco *et al.*, 2020; Papaefthymiou *et al.* 2003; Karpińska *et al.*, 2004; Kitto, 2005; Baeza *et al.*, 2018). Havendo, porém, alguns estudos realizados em locais de trabalho, como escritórios e edifícios industriais (Oikawa *et al.*, 2006; Clouvas *et al.*, 2007; Rahman *et al.*, 2010; Bucci *et al.*, 2011), hospitais (Mnich *et al.*, 2004; Oikawa *et al.*, 2006), escolas (Oikawa *et al.*, 2006; Bajanac *et al.*, 2006) e apesar de dados limitados, existem também alguns estudos sobre o radão do ar interior e as mudanças sazonais em edifícios universitários (Bahtijari *et al.*, 2007).

1.5.3 Medidas de Mitigação

O radão é considerado a fonte dominante de exposição humana à radiação ionizante e a sua entrada para o interior de um edifício depende, tal como referido anteriormente, da sua presença no solo sobre o qual o edifício foi construído, do material de construção e da água que abastece o edifício. Além disso, a concentração de radão no ar interior depende também de fatores antrópicos, nomeadamente características construtivas e padrões de utilização (WHO, 2009).

Os trabalhos desenvolvidos têm assinalado a importância das medidas de mitigação do radão, como a ventilação e o isolamento adequados, para reduzir os níveis de exposição (USEPA, 2020).

As estratégias de mitigação da concentração de radão para serem rentáveis, necessitam de ser adaptadas ao conjunto de informações do edifício, como as características da construção, as zonas climáticas, fonte de radão e mecanismos de transporte do radão para o interior do edifício (WHO, 2009).

Quando a fonte principal de entrada de radão num edifício é o solo, as medidas de mitigação a aplicar baseiam-se nas técnicas de ventilação ativa ou passiva, principalmente no solo abaixo do piso térreo (USEPA, 2001). Uma medida de mitigação eficaz é a despressurização ativa do solo. Esta medida baseia-se na instalação de um mecanismo de sucção instalado abaixo do piso ou laje da habitação em contato com o solo, expelindo o ar por uma chaminé, por exemplo, removendo o potencial radão que se acumule na divisão, renovando o ar (Henschel & Scott, 1991; Yuill, 1994; Henschel, 1995). Devido à sua alta confiabilidade na redução do radão em uma ampla variedade de casas e outros edifícios, este método, apesar das possíveis dificuldades de instalação do sistema numa habitação já existente, deve ser uma das primeiras abordagens consideradas. De acordo com uma pesquisa da OMS (2007), a despressurização ativa do solo corresponde à medida de mitigação, no que ao radão diz respeito, mais aplicada em países como: Alemanha, Áustria, Bélgica, Eslovénia, Estados Unidos da

América, Finlândia, Noruega, Reino Unido e Suécia. Já a despressurização passiva é utilizada em novas construções, sendo semelhante à técnica mencionada anteriormente, no entanto, a eficácia deste método irá depender da variação térmica do ar no tubo de ventilação e da sua capacidade de despressurizar levemente o solo sob a habitação. Estes sistemas funcionam geralmente em modo de aspiração, sendo esta aspiração proveniente da própria câmara de captação. A pressurização da câmara tende a funcionar eficazmente onde o solo é naturalmente muito permeável. Então, de maneira a tornar esta medida mais eficaz, é necessário a instalação de uma camada permeável uniforme sob todos os elementos em contato com o solo e o tubo de ventilação deverá permitir a fácil instalação de um ventilador estático rotativo em caso de falha do sistema na redução eficaz do radão. Este deve ser encaminhado principalmente através dos compartimentos mais quentes da habitação, sendo isolado em compartimentos não aquecidos, devido ao efeito que a temperatura tem na extração do radão, uma vez que ar quente permite o transporte ascendente do radão (Dewey *et al.*, 1994; WHO, 2009; APA, 2020). A técnica de despressurização ativa é mais simples de instalar e providencia uma maior redução da concentração de radão do que a despressurização passiva (USEPA, 1993).

Outra medida de mitigação que poderá ser implementada corresponde à impermeabilização de superfícies. Essa impermeabilização é efetuada através da aplicação localizada de produtos vedantes em zonas singulares ou da colocação de membranas prefabricadas, que separa o espaço interior ocupado, do solo. Nestes casos, o isolamento reduz a perda de ar condicionado de dentro do edifício, o que pode ser essencial (Henschel, 1993), e aumenta a reversão da pressão do ar do solo para o interior. Contudo, esta opção por si só tem um potencial limitado para a redução do radão, especialmente ao longo do tempo (Brennan *et al.*, 1990; Scott, 1993), pois não aborda um dos fatores que permitem a entrada de radão do solo para o ar interior, o fluxo de ar impulsionado pela pressão. Por exemplo, o sucesso com apenas esta estratégia de mitigação, foi relatado em apenas 1 em 1500 casos, e portanto, não é recomendada por si só e deve ser complementada com outras medidas de mitigação (Turk *et al.* 1991; USEPA, 1993; APA, 2020). Ainda assim, na Finlândia, a aplicação de apenas esta medida de mitigação permitiu reduzir as concentrações de radão no ar interior em 10 a 30% (Arvela & Hoving, 1993).

Outro método será a ventilação de espaços vazios, entre o solo e o espaço ocupado (por exemplo, caixas de ar) que podem reduzir as concentrações de radão no ar interior. A eficácia dessa estratégia depende de vários fatores, como o isolamento do piso acima do espaço vazio e a distribuição de ligações ao exterior em volta do perímetro do espaço vazio (WHO, 2009).

Quando a presença de radão no ar interior de um edifício está relacionada com a água que abastece o mesmo, o tratamento dessa água pode ser eficaz na redução da concentração de

radão no ar interior. Neste caso, o “arejamento” é uma das principais estratégias para reduzir o radão presente na água e consiste em um tanque selado, onde são injetadas com bolhas de ar na água de modo a que o radão dissolvido passe para a atmosfera. Outro método passa pela filtração da água com carbono granular ativo, que é geralmente uma solução mais barata, e com resultados menos promissores, pois há uma menor redução de radão (Lowry, 1983; Lowry & Lowry, 1988; Watson & Crawford-Brown, 1991).

Uma metodologia que poderá ser eficaz, independentemente da fonte de introdução do radão no ar interior de um edifício, corresponde a uma ventilação eficaz do edifício. Essa ventilação pode ser efetuada de forma ativa, por meio de ventiladores que garantem a substituição do ar interior por ar novo, ou de forma passiva, utilizando janelas ou aberturas para o exterior. Há evidências limitadas sobre a eficácia da ventilação passiva ou natural para o controlo do radão (Cavallo *et al.* 1992, 1996). Todavia, em climas moderados, como na Irlanda, a ventilação é usada como método eficaz de mitigação de radão (Synnott, 2004, 2007). A ventilação, através de equipamentos que a permitem executar pode reduzir as diferenças de pressão entre o solo e o espaço ocupado, bem como a diluição do radão presente no ar interior depois de entrar na divisão. Esta técnica é especialmente útil quando a maior fonte de radão provém dos materiais de construção e/ou o edifício se encontra numa região amena que tenha pouca ventilação natural (WHO, 2009).

2 Caracterização da Área de Estudo

2.1 Nota Prévia

A área de estudo do presente trabalho corresponde à cidade de Ponta Delgada, inserida no Sistema Fissural da Região dos Picos, que está instalado entre o Vulcão das Sete Cidades e o Vulcão do Fogo, na ilha de São Miguel (Ferreira *et al.*, 2015).

O Sistema Fissural da Região dos Picos é caracterizado essencialmente pela presença de alinhamentos de cones de escórias, escoadas lávicas com morfologias do tipo *pahoehoe* ou *aa*, formando extensas áreas que se estendem para norte e sul, com declives levemente suaves. Ocasionalmente, tal como observado na última erupção que ocorreu neste sistema vulcânico, podem ocorrer erupções cujos produtos resultantes apresentam composição traquítica (*s.l.*). A zona estudada é composta por escoadas lávicas e piroclastos basálticos (*s.l.*) de idade superior a 5000 anos (Ferreira, 2000).

Atualmente, a atividade vulcânica na ilha de São Miguel restringe-se a manifestações de vulcanismo secundário, nomeadamente através de zonas de desgaseificação difusa, fumarolas, nascentes de águas termais e gasocarbónicas (Cruz *et al.*, 1999; Viveiros *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2014b; Caliro *et al.*, 2015) essencialmente presentes nos vulcões centrais existentes na ilha.

Neste capítulo, procura-se caracterizar geologicamente a área de estudo.

2.2 Localização Geográfica

O arquipélago dos Açores, constituído por nove ilhas de origem vulcânica, situa-se no Oceano Atlântico Norte de acordo com a direção WNW-ESE ao longo de uma faixa de cerca de 600 km de comprimento, entre as latitudes 39°43' e 36°55'N e as longitudes 31°16' e 24°46'W. Geograficamente, as ilhas distribuem-se em três grupos: o Grupo Ocidental, do qual fazem parte as ilhas das Flores e do Corvo; o Grupo Central, que inclui as ilhas do Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira; e o Grupo Oriental composto pelas ilhas de São Miguel, Santa Maria e os Ilhéus das Formigas (Figura 2.1)

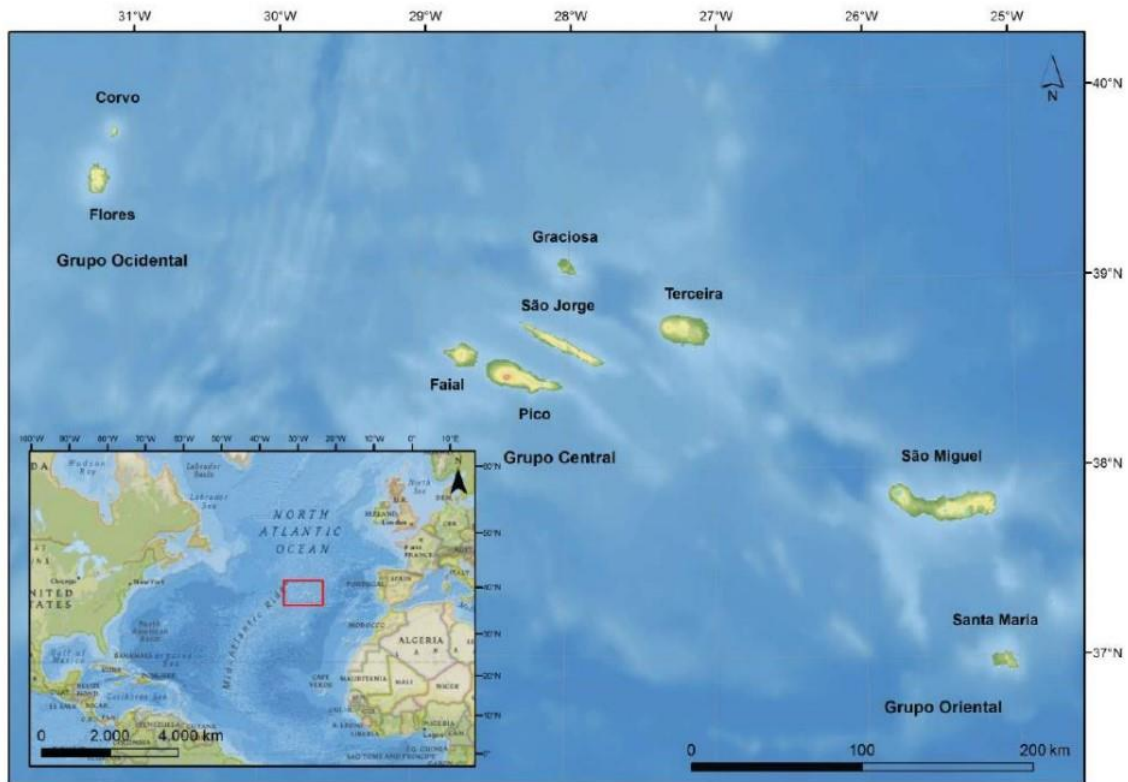


Figura 2.1 - Localização geográfica do arquipélago dos Açores (*in*: Medeiros, 2018).

A área de estudo do presente trabalho, a cidade de Ponta Delgada, pertence ao concelho também ele designado de Ponta Delgada e está localizada no lado sul da ilha de São Miguel, que corresponde à maior e mais populosa ilha do arquipélago. A área de estudo, com aproximadamente 10,1 km², corresponde à área urbana da cidade de Ponta Delgada, circunscrita, grosso modo, pela segunda circular, e engloba total ou parcialmente as freguesias de Santa Clara, São José, São Sebastião e São Pedro (Figura 2.2).

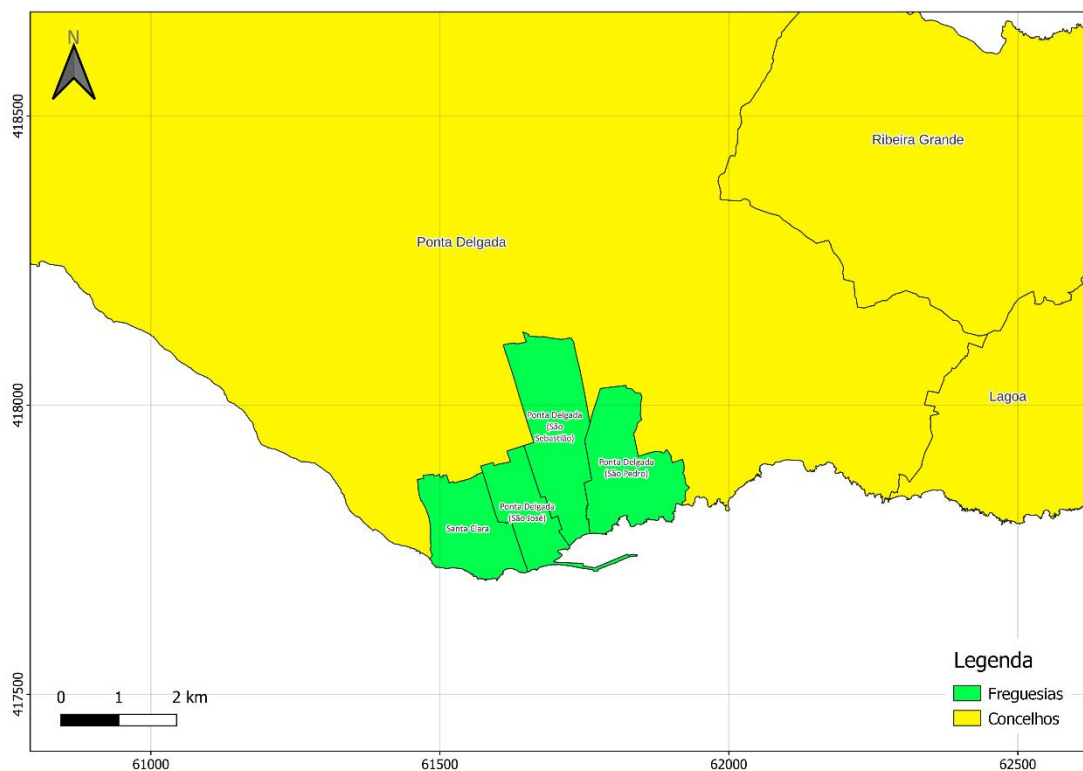


Figura 2.2 – Localização das freguesias de Santa Clara, São José, São Sebastião e São Pedro, Ponta Delgada, ilha de São Miguel (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

2.3 Enquadramento Geotectónico

Em termos geotectónicos o arquipélago dos Açores localiza-se na designada Junção Tripla dos Açores, uma zona de confluência das placas litosféricas Euroasiática, Núbia e Norte-Americana. A região tem como principais estruturas a Crista Média Atlântica, o *Rift* da Terceira (Machado, 1959), a Falha Gloria (Laughton *et al.*, 1972) e a Zona de Fratura Este dos Açores (Searle, 1980) (Figura 2.3), sendo, portanto, uma área complexa do ponto de vista tectónico.

A Plataforma dos Açores é definida pela curva batimétrica dos 2000 m (Needham & Francheteau, 1974) e corresponde a uma área sobrelevada do fundo oceânico, de forma aproximadamente triangular. Este relevo apresenta uma morfologia complexa, onde se verificam as elevações formadas por ilhas e cristas submarinas, com alternância de fossas, isto é, depressões tectónicas, estabelecendo assim, vários alinhamentos vulcanotectónicos (Lourenço *et al.*, 1998; Madeira *et al.*, 2005). Nesta região, a crosta oceânica exhibe uma espessura anormalmente elevada, com cerca de 14 km segundo vários autores (e.g. Escartín *et al.*, 2001; Dias *et al.*, 2007), algo que tem ligação a um magmatismo intenso, sugerindo a maioria dos autores a existência de um *hotspot* sob a Plataforma dos Açores (Vogt & Jung, 2003).

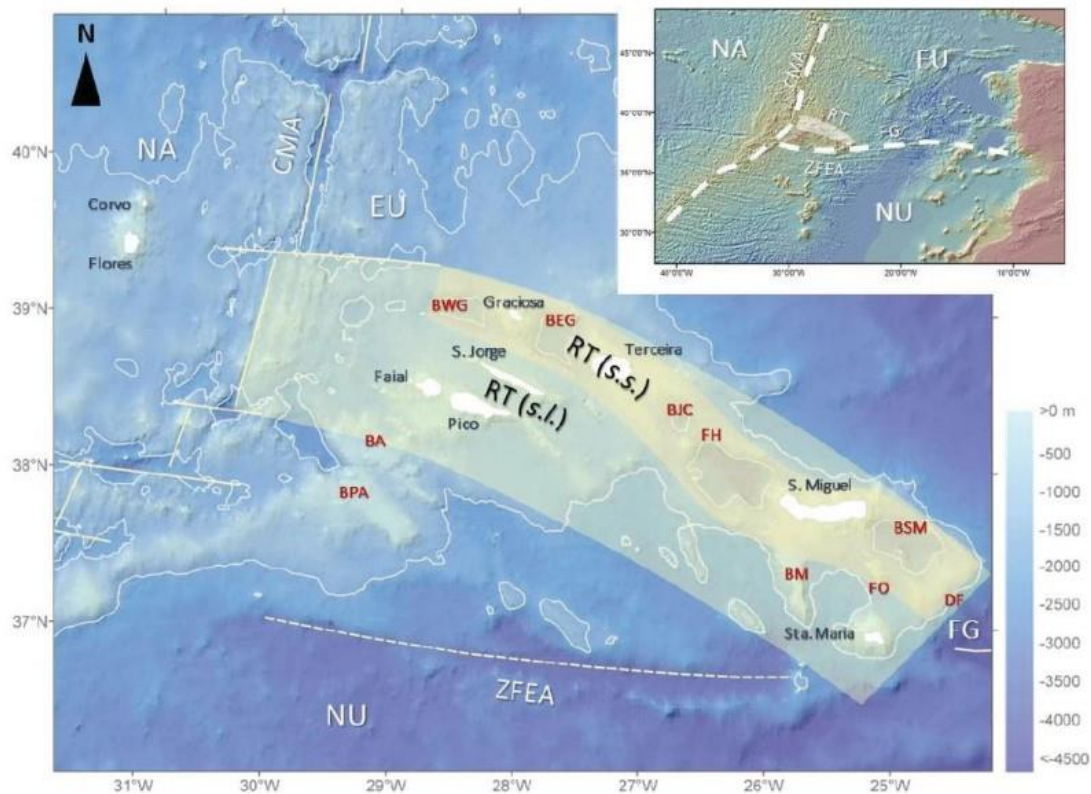


Figura 2.3 - Enquadramento tectónico do arquipélago dos Açores (batimetria regional de Lourenço *et al.*, 1998).
 Legenda: NA – Placa Norte-Americana; EU – Placa Eurasiática; NU – Placa Núbia; CMA – Crista Média Atlântica; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – Rift da Terceira; FG – Falha Gloria; FO – Ilhéus das Formigas; DF – Desfiladeiro das Formigas; BSM – Bacia de São Miguel; BM – Banco do Mónaco; FH - Fossa Hirondelle; BJC - Banco D. João de Castro; BEG - Bacia Este da Graciosa; BWG - Bacia Oeste da Graciosa; BA – Banco Açor; BPA - Banco Princesa Alice (*in*: Aguiar, 2018).

São Miguel é a maior ilha do arquipélago com, aproximadamente, 745 km² de área e um alongamento geral de direção E-W. Devido ao enquadramento geodinâmico característico das ilhas dos Açores, é possível verificar que a ilha de São Miguel é condicionada pelo *Rift* da Terceira, que se estende, de forma geral, segundo uma direção NW-SE, desde a Bacia Oeste da Graciosa até à Fossa das Formigas. Os alinhamentos de cones de escórias e escarpas de falha são exemplos das diferentes estruturas vulcanotectónicas que demarcam a ilha de São Miguel, em consequência da forte influência da direção regional (Zbyszewski *et al.* 1971; Ferreira, 2000).

2.4 Enquadramento Geológico

2.4.1 Geomorfologia

Na ilha de São Miguel identificam-se três vulcões centrais ativos: Sete Cidades, Fogo (também referenciado na bibliografia como Vulcão de Água de Pau) e Furnas, de composição essencialmente traquítica. As zonas de vulcanismo fissural consideradas ativas desenvolvem-se entre estes vulcões poligenéticos, onde se identificam vários centros monogenéticos, sendo a maior parte de natureza basáltica *s.l.*. Assim, o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015), localiza-se entre os vulcões das Sete Cidades e do Fogo, e o Sistema Vulcânico Fissural do Congro, entre os vulcões do Fogo e das Furnas. Na ponta nascente da ilha situam-se os sistemas vulcânicos da Povoação e Nordeste, que são considerados extintos (Figura 2.4) (Carmo *et al.*, 2015). Relativamente aos vulcões centrais, estes têm apresentado um vulcanismo maioritariamente explosivo ao longo da sua história eruptiva, ao passo que as zonas de vulcanismos fissural, apesar de casualmente ocorrerem erupções traquíticas, são caracterizadas principalmente pela ocorrência de erupções basálticas, resultando em alinhamentos de cones de escórias (Guest *et al.*, 1999).

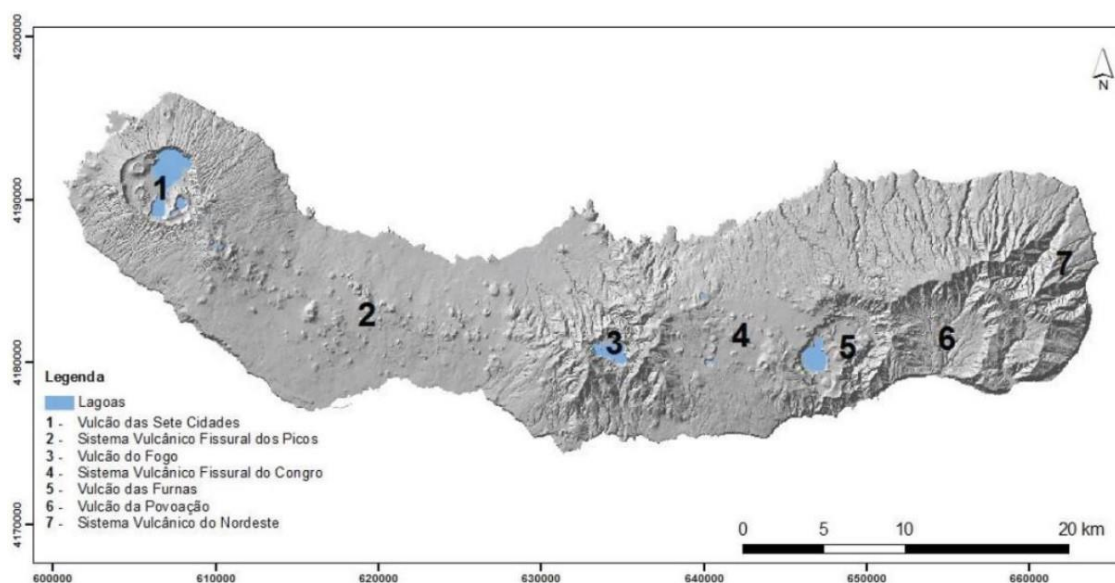


Figura 2.4 - Identificação dos complexos vulcânicos da ilha de São Miguel. 1 - Complexo Vulcânico das Sete Cidades; 2 - Sistema Vulcânico Fissural dos Picos; 3 - Complexo Vulcânico do Fogo; 4 - Sistema Vulcânico Fissural do Congro; 5 - Complexo Vulcânico das Furnas; 6 - Complexo Vulcânico da Povoação; 7 - Complexo Vulcânico do Nordeste. (adaptado de Moore, 1991b, *in*: Gaspar *et al.*, 2015a)) (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

Entre as diversas estruturas e formas vulcânicas encontradas por toda a ilha, os cones de escórias são os mais frequentes (Figura 2.5), tendo um alinhamento condicionado pela tendência da tectónica regional ditada pelo *Rift* da Terceira (Ferreira *et al.*, 2015).

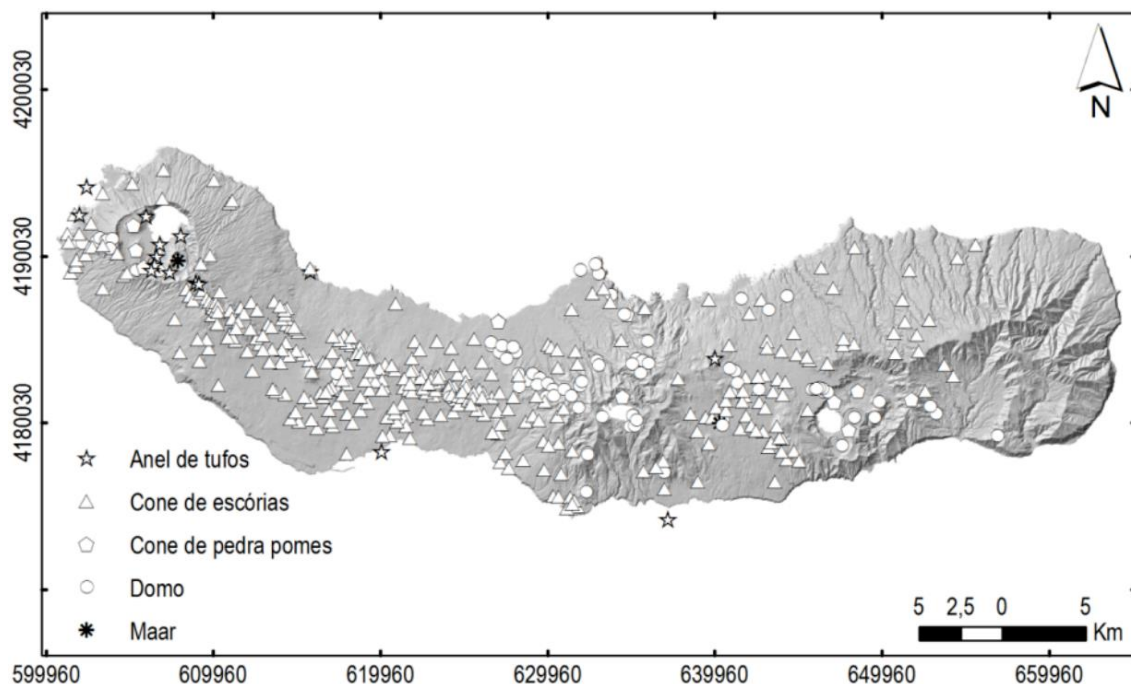


Figura 2.5 - Principais estruturas vulcânicas da ilha de São Miguel (dados de Gaspar *et al.*, 1995; Queiroz, 1995; Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000; Carmo *et al.*, 2009; Carmo *et al.*, 2015). Coordenadas UTM, zona 26S, Datum WGS84 (in: Pacheco *et al.*, 2012).

A cidade de Ponta Delgada encontra-se inserida no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, a zona menos elevada da ilha, que se encontra compreendida entre o Vulcão das Sete Cidades e o Vulcão do Fogo. A superfície topográfica do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, é intensamente marcada pela presença de vários cones de escórias sendo esta área coberta principalmente por fluxos de lava e piroclastos de composição basáltica (*s.l.*), embora em zonas sem atividade vulcânica recente também seja possível observar piroclastos de composição traquítica (*s.l.*), que provêm maioritariamente da atividade de vulcões centrais próximos. O Complexo dos Picos estende-se desde a fronteira sudeste da caldeira das Sete Cidades até ao flanco ocidental do Fogo, atingindo uma extensão aproximada de 24 km. Tem uma largura variável de 12 a 7,5 km e uma área de 200 km². Ferreira (2000) definiu este sistema vulcânico com base na existência de um padrão morfoestrutural regular definido por vários alinhamentos de cones de escória e fissuras eruptivas, que estão dispostos numa direção dominante NW-SE. É a área vulcânica mais jovem de São Miguel, tendo a sua formação iniciado há aproximadamente 50000 anos (Moore, 1991).

O Sistema Vulcânico Fissural dos Picos apresenta um segmento ocidental que se estende por 15 km na direção NW-SE e um segmento leste que se estende na direção W-E por 9 km, com largura máxima de 12 km, sendo que a cidade de Ponta Delgada insere-se no primeiro. É assinalado pela presença de diversos alinhamentos de cones de escórias, seguindo uma direção predominantemente NW-SE. Embora alguns cones apresentem secções circulares, a

maioria apresenta formas alongadas paralelas à orientação das fissuras eruptivas. O topo dos cones são truncados por uma ou múltiplas crateras. Ocasionalmente é possível identificar alguns domos, cones de pedra pomes e *maars*, sendo o primeiro associado principalmente à atividade eruptiva do Vulcão do Fogo. Os fluxos de lava são o produto vulcânico dominante neste sistema vulcânico e contruíram as paisagens das encostas sul e norte da ilha. Embora uma proporção substancial da superfície esteja coberta por depósitos piroclásticos, vegetação densa e ocupação humana, alguns campos de lava ainda podem ser facilmente reconhecidos. A maioria dos fluxos de lava têm morfologia *aa*, mas lavas *pahoehoe* também estão presentes (Ferreira, 2000; Carmo *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2015).

Na figura 2.6 observa-se o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos representado por limites espaciais definidos por Ferreira (2000), que demonstram os alinhamentos de centros monogenéticos na área, definidos com base na distribuição das formas morfológicas mais comuns, bem como no padrão tectónico associado (Figura 2.7) (Ferreira, 2000; Carmo *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2015).

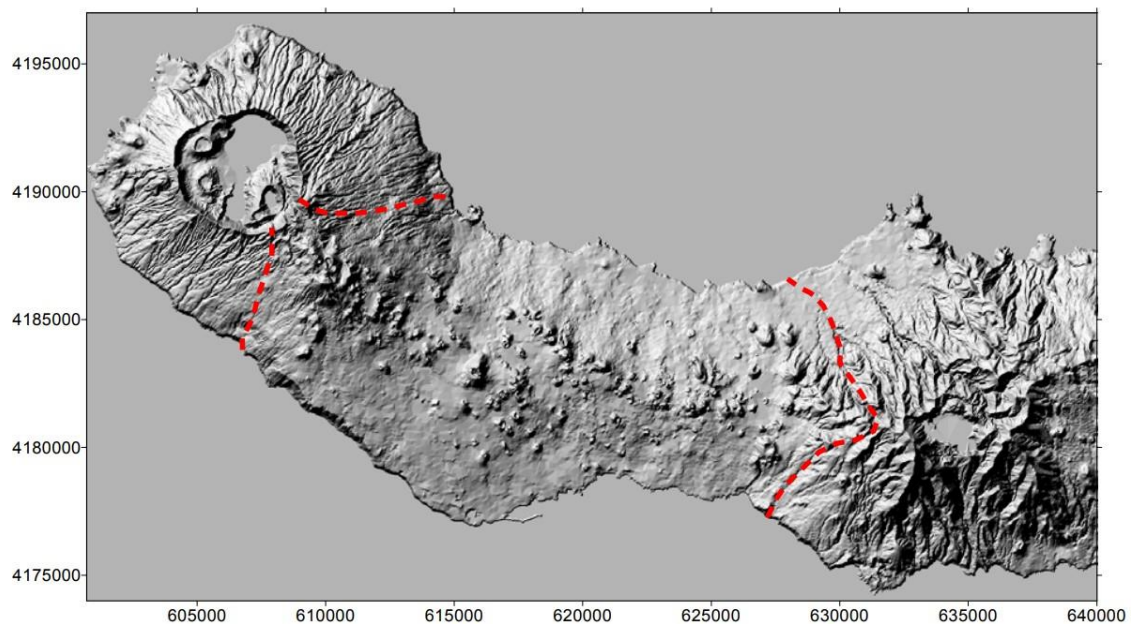


Figura 2.6 - Projeção dos limites espaciais (a vermelho) considerados para o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. Coordenadas UTM, da zona 26S (*in*: Ferreira, 2000).

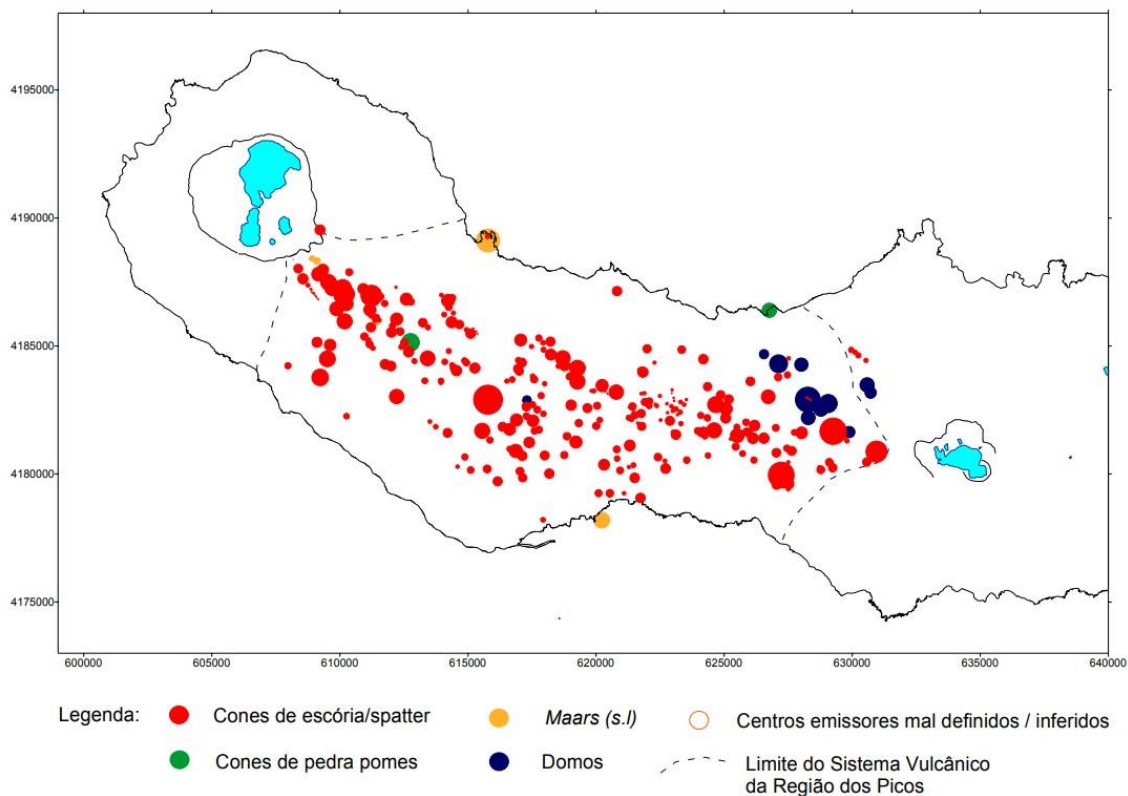


Figura 2.7 - Distribuição de centros eruptivos na área definida para o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. Coordenadas UTM, da zona 26S. (in: Ferreira, 2000).

Ao longo de um eixo longitudinal, a maior concentração de edifícios vulcânicos origina uma faixa central de relevo irregular, onde a distribuição das altitudes mostra-se bastante variável (Figura 2.8). Desta forma, no setor oeste, sobre a vertente SE do Vulcão das Sete Cidades, o ponto culminante (874 m) corresponde ao vértice geodésico do Pico das Éguas. No setor centro, com o ponto mais elevado (485 m) localizado no vértice geodésico da Serra Gorda, a área apresenta uma altimetria menor. No setor este, sobre o flanco oeste do Vulcão do Fogo, o ponto de mais elevado alcança os 673 metros (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

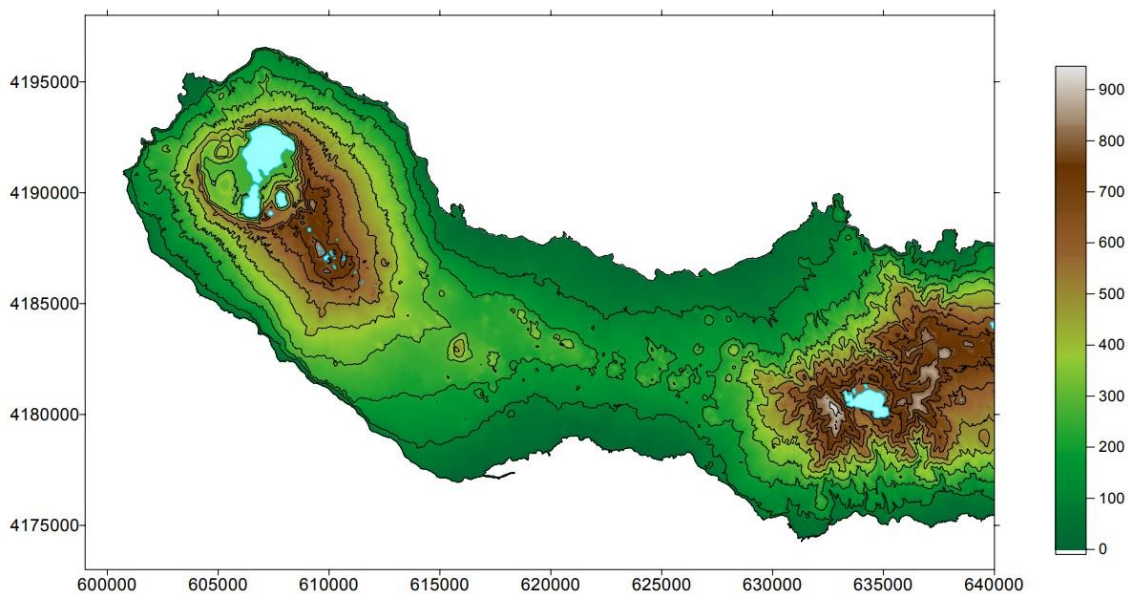


Figura 2.8 - Mapa hipsométrico da região centro-oeste da ilha de São Miguel. Coordenadas UTM, da zona 26S (*in*: Ferreira, 2000).

Partindo do referido eixo longitudinal, para norte e para sul, as vertentes desenvolvem-se suavemente até ao mar, com declives médios da ordem dos 2 graus. À medida que se caminha para as extremidades da área, estes aumentam progressivamente, atingindo valores da ordem dos 8 graus, devido à influência dos vulcões centrais que a limitam a este e a oeste (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

Pequenas arribas com menos de 50 m e dominadas pela presença de escoadas lávicas, demarcam a linha de costa. As zonas coincidentes com os flancos dos vulcões das Sete Cidades e do Fogo, apresentam arribas mais altas, pois a quantidade e espessura de níveis piroclásticos de natureza traquítica aumentam significativamente. Assim sendo, o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, será composto por intercalações de escoadas lávicas provenientes dos centros eruptivos da região e pelos depósitos vulcanoclásticos mencionados acima (Ferreira, 2000).

2.4.2 Tectónica

A tectónica da ilha de São Miguel (Figura 2.9) é caracterizada por estruturas com direções de índole regional, como NW-SE e WNW-ESE, que se podem identificar no Graben dos Mosteiros e no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, e por estruturas tectónicas de índole local, cujas direções são NNW-SSE, N-S, NE-SW e E-W (Ferreira, 2000; Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015).

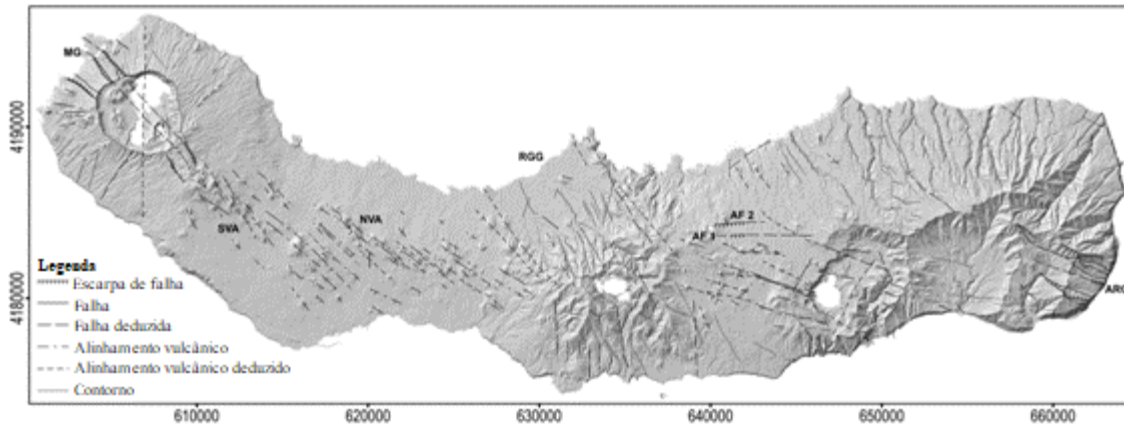


Figura 2.9 - Mapa vulcanotectónico da ilha de São Miguel (Carmo, 2013). Legenda: MG – Graben dos Mosteiros; SVA – Alinhamento Vulcânico Sul; NVA – Alinhamento Vulcânico Norte; RGG – Graben da Ribeira Grande; AF1 – Falha Altiprado 1; AF2 – Falha Altiprado 2; ARG – Graben de Água Retorta. Coordenadas UTM, zona 26S (adaptado de Carmo *et al.*, 2015).

As principais estruturas tectónicas do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos encontram-se essencialmente marcadas por alinhamentos de centros vulcânicos monogenéticos, resultantes do vulcanismo fissural. Desta forma, a sua representação é exposta com base na morfologia das crateras e dos cones de escórias. Por vezes, podem ocorrer estruturas distensivas, como pequenas escarpas e fissuras eruptivas, associadas a intrusões magmáticas (Carmo, 2013).

A distribuição espacial das formas vulcânicas revela a formação de um eixo longitudinal associado a um sistema de fraturas com uma direção geral NW-SE, concordante com o sistema tectónico regional (Ferreira, 2000), estendendo-se entre 324 e 6750 metros de comprimento. Ao longo deste sistema vulcânico, as falhas tectónicas ficam frequentemente ocultas sob fluxos de lava. No entanto, a distribuição espacial dos centros eruptivos e a orientação das fissuras eruptivas permite estabelecer duas cristas principais com orientação geral NW-SE, localizadas uma mais a norte e outra mais a sul (Zbyszewski *et al.*, 1959; Ferreira, 2000). A crista situada mais a sul, denominada de Alinhamento Vulcânico Sul (SVA), corresponde ao prolongamento SE da zona de fratura que forma o graben dos Mosteiros, atravessando o Vulcão das Sete Cidades e estendendo-se até à zona de Ponta Delgada. A crista mais norte, denominada de Alinhamento Vulcânico Norte (NVA), desenvolve-se a partir do norte de Ponta Delgada até ao flanco ocidental do Vulcão do Fogo. Embora ambas as zonas de fratura apresentem uma tendência NW-SE, no setor leste da zona fissural dos Picos, a distribuição dos centros eruptivos é mais dispersa numa tendência E-W (Figuras 2.10 e 2.11) (Carmo *et al.*, 2015).

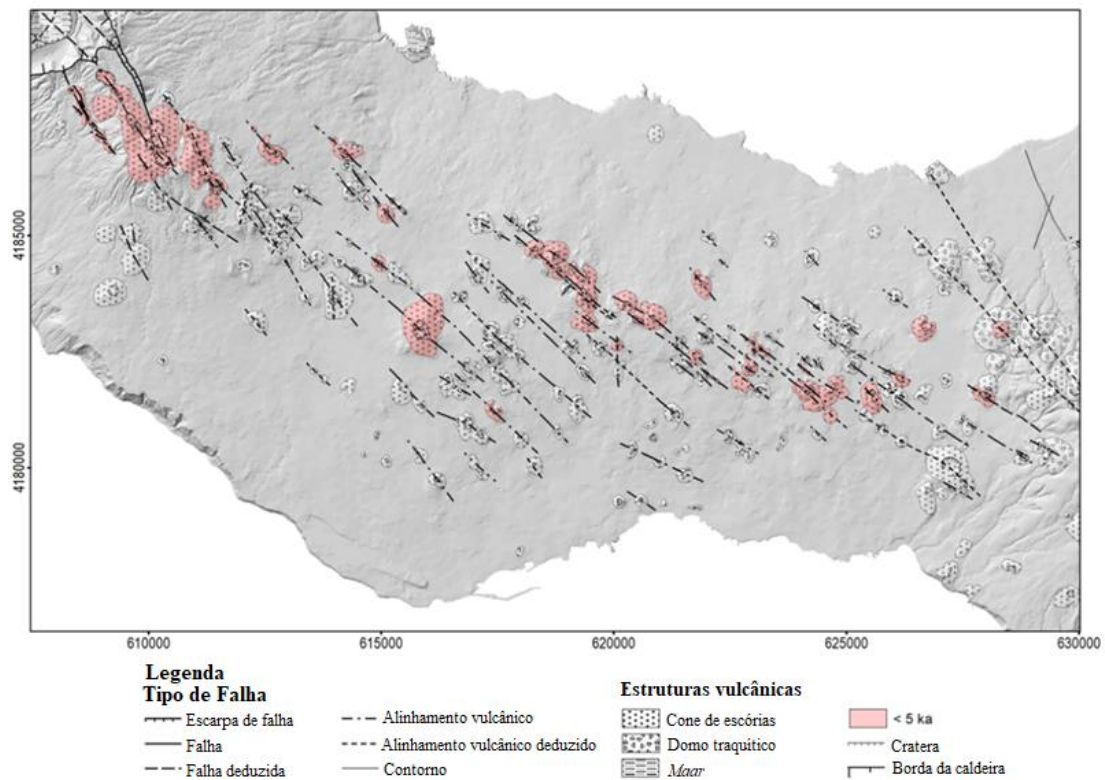


Figura 2.10 - Localização dos centros eruptivos do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. A rosa estão indicados os centros < 5 ka (adaptado de Ferreira *et al.*, 2015).

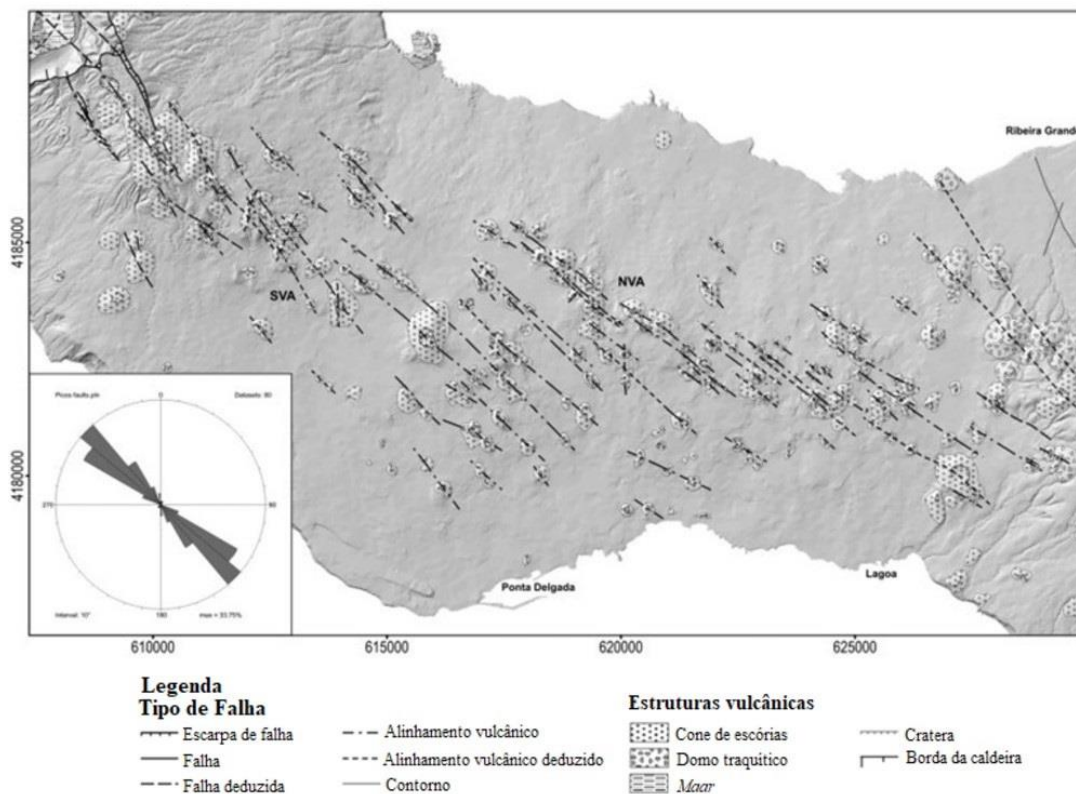


Figura 2.11 - Principais estruturas vulcanotectónicas do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Carmo, 2013) e histograma circular de frequências não ponderadas das direções do plano de falha (TectonicsFP software; Ortner *et al.*, 2002). SVA - Alinhamento Vulcânico Sul; NVA - Alinhamento Vulcânico Norte (adaptado de Carmo *et al.*, 2015).

2.4.3 Vulcanoestratigrafia

O Sistema Vulcânico Fissural dos Picos é o mais recente da ilha de São Miguel. Tendo em conta a datação das rochas aflorantes mais antigas (Moore, 1991), o seu surgimento terá ocorrido há pouco mais de 50000 anos, colmatando toda a área submarina existente entre os vulcões das Sete Cidades e do Fogo. Na sua fase inicial, o vulcanismo terá sido definido por erupções submarinas, hidromagmáticas e mais tarde por atividade subaérea do tipo fissural, maioritariamente assinalada por episódios eruptivos do tipo havaiano e estromboliano, que deram origem a cones de escórias e de fragmentos basálticos aglutinados (*spatter cones e spatter ramparts*), maars, domos e escoadas lávicas (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

A atividade basáltica em São Miguel nos últimos 50.000 anos ocorreu principalmente nos sistemas vulcânicos fissurais dos Picos e do Congro, desenvolvendo cristas basálticas predominantemente com orientações NW-SE e WNW-ESE, embora alguns cones de escória se tenham formado nos flancos dos três vulcões centrais ativos (Ferreira *et al.*, 2015). Não se consegue confirmar se esses cones de escória estão diretamente relacionados com as cristas basálticas ou representam erupções típicas dos flancos dos vulcões, mas em alguns casos, a interação de ambos os sistemas de condutas vulcânicos pode ter ocorrido, como foi sugerido para o evento vulcânico do Fogo de 1563 (Storey *et al.*, 1989; Wallenstein, *et al.*, 2015).

Uma vez que os depósitos de materiais deste sistema eruptivo apresentam uma fraca dispersão, é difícil desenvolver uma estratigrafia e uma reconstituição detalhada da sua história eruptiva, não sendo fácil estabelecer níveis de referência. A vulcanoestratigrafia do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos é descrita em relação à posição dos focos eruptivos e produtos vulcânicos relativamente ao depósito Fogo A. Este depósito, resultante de uma erupção vulcânica centrada no vulcão do Fogo há cerca de 5000 anos, representa um dos melhores níveis de referência estratigráfica dada a sua grande dispersão geográfica que cobriu toda a ilha, sendo extremamente útil para correlações da estratigrafia recentes da ilha (Wallenstein *et al.*, 2015 e referências nele citadas). Assim, Ferreira (2000) definiu a divisão desta unidade geológica em duas subunidades: i) a subunidade de Ponta Delgada, formada desde a fase de aparecimento até há 5000 anos, constituída por escoadas lávicas e piroclastos basálticos (*s.l*) contendo todos os centros eruptivos e produtos vulcânicos mais antigos, que sobressaem com maior expressão no setor sul do sistema vulcânico, entre as Feteiras e Ponta Delgada; ii) a subunidade do Pinhal da Paz, que abrange todos os centros e produtos vulcânicos ocorridos nos últimos 5000 anos, distribuídos ao longo de duas cristas vulcanotectónicas que caracterizam o sistema, com particular incidência na que se desenvolve mais a norte. Nesta subunidade, consegue-se definir relações estratigráficas com o Membro da Pepom da Formação das Lagoas (5000 anos)

(Queiroz *et al.*, 2015) que estão associados a atividade eruptiva registada no Vulcão das Sete Cidades. Neste período mais recente, Ferreira (2000) identificou a ocorrência de cerca de 30 erupções.

Na sequência do referido, e tal como se pode observar na figura 2.12, a cidade de Ponta Delgada está localizada no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, numa área coberta essencialmente por rochas basálticas (*s.l.*) com idades superiores a 5000 anos (Moore, 1990). De facto, a cidade de Ponta Delgada, está localizada sobre rochas basálticas do plistocénico e holocénico.

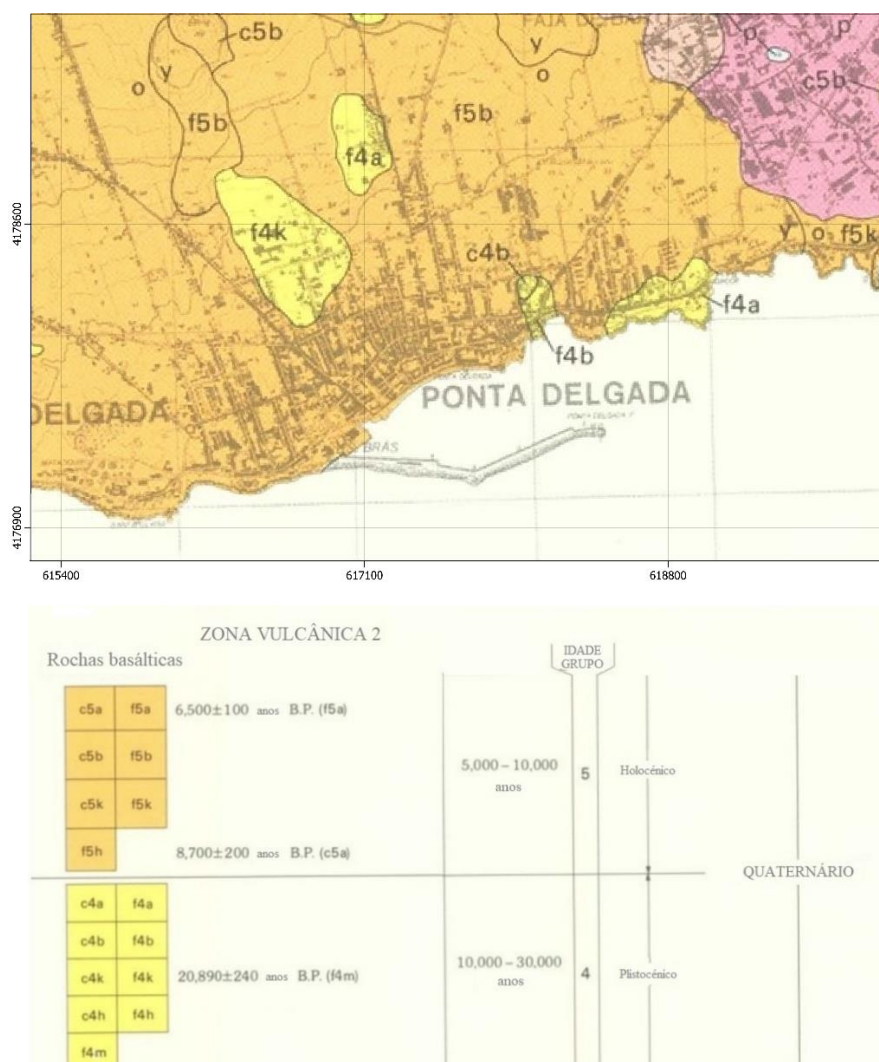


Figura 2.12 - Cartografia de depósitos vulcânicos de antigas erupções que afetaram a área onde se localiza a cidade de Ponta Delgada e a sua respetiva legenda (adaptado de Moore, 1991).

As rochas basálticas que se encontram na cidade de Ponta Delgada são essencialmente fluxos de lava *aa* e *pahoehoe* de ankaramite, basanitoide e basaltos híbridos com idades entre os 5000 e os 10000 anos (Holocénico). A ankaramite contém entre 10 a 20% de olivina, 10 a 20% de piroxena e 1 a 2% de fenocristais de plagióclase. O basanitoide é africano. O basalto híbrido

contém 4 a 10% de plagioclase corroída, 1 a 4% de olivina, 1 a 2% de piroxena e menos de 1% de fenocristais de biotite e xenólitos dispersos de wherlite, piroxenite e gabro. Existem também algumas zonas na cidade com rochas basálticas de idades entre os 10000 e os 30000 anos (Plistocénico) sendo elas depósitos de *spatter* e fluxos de lava *aa* e *pahoehoe* de ankaramite, basanitoide, basalto olivínico alcalino, hawaiiite e mugearite. Aqui a ankaramite contém 10 a 20% de olivina, 10 a 15% de piroxena e menos de 1% de fenocristais de plagioclase. O basanitoide, a hawaiiite e a mugearite são geralmente afíricos. O basalto olivínico alcalino contém 2 a 8% de olivina, 2 a 6% de piroxena e 1 a 3% de fenocristais de plagioclase (Moore, 1991).

2.5 Sismicidade e Erupções Vulcânicas Históricas

Conforme referido anteriormente, em consequência da dinâmica observada nesta região do Atlântico Norte, o *Rift* da Terceira tem sido um local com uma atividade sísmica significativa ao longo dos anos (Figura 2.13), apresentando uma tendência geral WNW-ESE. A oeste do Crista Média Atlântica, não foram registados eventos importantes e a sismicidade é vestigial ou inexistente (Carmo *et al.*, 2020). É de realçar a existência de diversas zonas sismogénicas que se evidenciam pela sua elevada sismicidade, como é o caso da região dos ilhéus das Formigas, a Fossa da Povoação, a zona central de São Miguel, a Fossa Hirondelle, a Crista Submarina Leste da Terceira, a Fossa Oeste da Graciosa e a zona a WW do Faial (Pacheco *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2020). A sismicidade mais recente demonstra atividade em outras áreas sismogénicas associadas à crise sismovulcânica que ocorreu na ilha de São Jorge no período de 2022 e 2023 e à crise sismovulcânica que se encontra em curso na ilha Terceira.

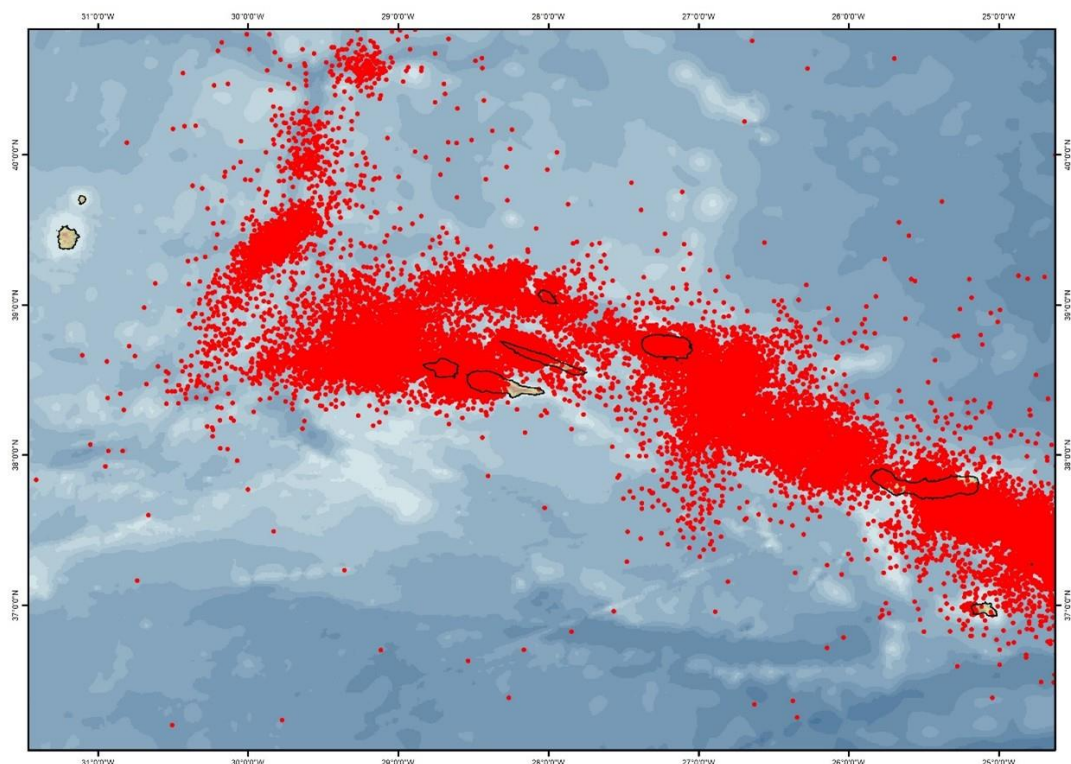


Figura 2.13 - Carta epicentral dos Açores no período compreendido entre 1980 e 2023 (CIVISA, dados não publicados).

O arquipélago dos Açores tem sido frequentemente afetado por fortes sismos seguidos de réplicas, mostrando o padrão típico de sismo/réplica. Em geral, a ocorrência de enxames sísmicos também é bastante comum, ocorrendo normalmente em regiões vulcânicas ativas e/ou geotérmicas, podendo estar relacionados com o movimento do magma localizado em camadas pouco profundas (Spicák & Horálek, 2001; Hensch *et al.*, 2008) e/ou associados à circulação de fluido hidrotermal através de fraturas novas ou pré-existentes (Husen *et al.*, 2004; Farrel *et al.*, 2009).

A sismicidade no arquipélago dos Açores é geralmente caracterizada por eventos de magnitude intermédia a baixa, ocorrendo casualmente sismos com magnitude superior a 5 (na Escala de Richter) com consequências por vezes catastróficas (Pacheco *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2020). Desde o povoamento do arquipélago dos Açores, durante o século XV, cerca de 30 sismos destrutivos e várias crises sísmicas resultaram em milhares de mortes e danos graves (Gaspar *et al.*, 2015b). Esses eventos foram reposicionados e reavaliados por Silveira (2002), Silveira *et al.* (2003) e Silva (2015) utilizando a escala Macrossísmica Europeia-1998 (EMS-98, Grünthal, 1998).

Até ao presente, as ilhas têm sido palco de inúmeros eventos sísmicos (Figura 2.14), tendo origem tectónica ou vulcânica, considerando-se os primeiros os mais destruidores,

segundo Agostinho (1936). Apesar da sua localização no oceano, esses sismos foram responsáveis por milhares de mortes, muitas pessoas desalojadas e grandes danos (Silva *et al.*, 2020).

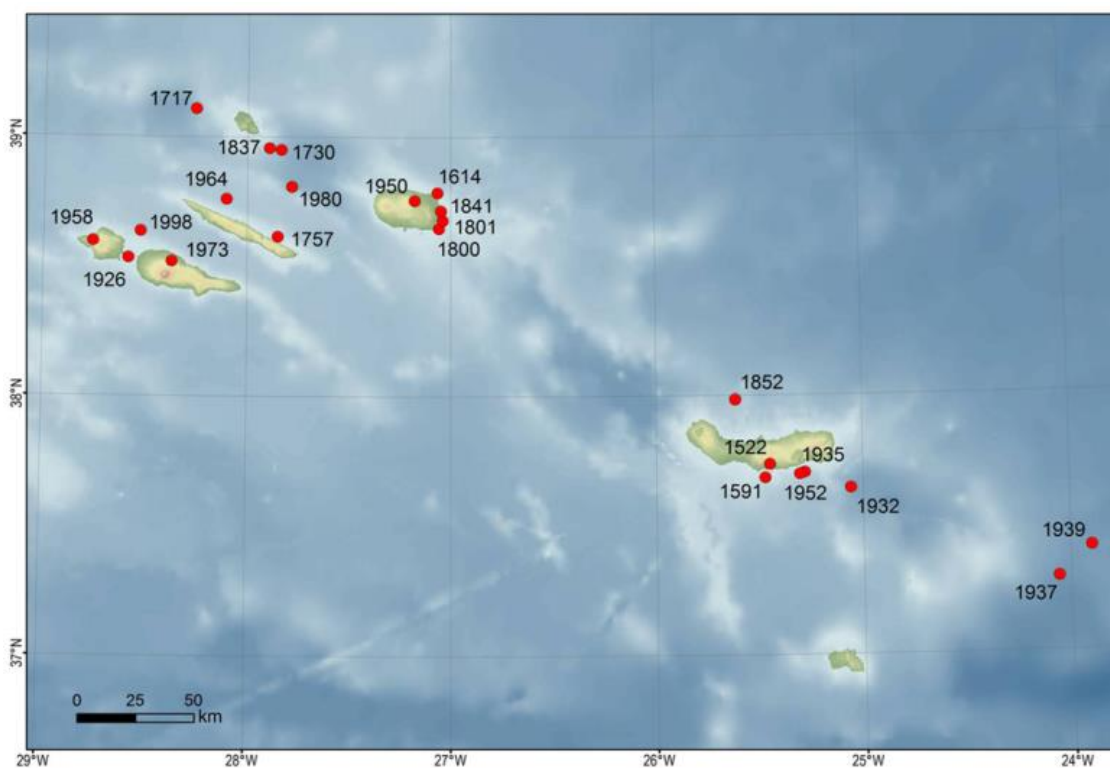


Figura 2.14 - Localização dos principais sismos destruidores na região dos Açores (in: Gaspar *et al.*, 2015b).

Os sismos mais destruidores e de maior magnitude de que há registo aconteceram em 1757 (Calheta, ilha de S. Jorge) e em 1980 (Grupo Central), tendo apresentado uma magnitude superior a 7 na Escala de Richter (Pacheco *et al.*, 2012). Na tabela 2.1 estão apresentados alguns dos sismos mais importantes que afetaram a ilha de São Miguel, destacando-se, o primeiro grande sismo ocorrido nos Açores, datado de 22 de outubro de 1522 (Frutuoso, [1522] 1592), atingindo uma intensidade X nas escalas de Mercalli-Cancani-Sienberg-1917 (MCS-17) (Dias, 1945), de Mercalli Modificada-1956 (MM-56) (Machado, 1966) e Macrossísmica Europeia-1998 (EMS-98) (Silveira, 2002). Apesar de toda a ilha ter sido afetada, o maior grau de destruição ocorreu na zona sul central da ilha (Frutuoso [1873] 1981). Este sismo provocou vários movimentos de vertente por toda a ilha, mas Vila Franca do Campo foi a localidade que mais sofreu; poucos minutos após o sismo, desencadeou-se uma grande escoada detrítica, soterrando quase completamente a região (Frutuoso [1591] 1981; Pacheco *et al.*, 2012; Marques *et al.*, 2015). Este fluxo de detritos teve origem numa serra localizada na parte superior da vila, situada a cerca de 1,250 km da mesma e foi canalizado através do vale da Ribeira da Mãe de

Água, espalhando-se no seu setor final, atingindo o oceano e iniciando um pequeno tsunami (Cabral, 2020; Silva *et al.*, 2020).

Tabela 2.1 - Principais sismos históricos que afetaram a ilha de São Miguel (adaptado de Wallenstein, 1999).

Data	Intensidade	Ilha mais afetada	Zona mais afetada	Consequências
1522-10-22	X	S. Miguel	Vila Franca do Campo	Cerca de 5000 mortes. Grandes destruições
1591-07-26	VIII (?)	S. Miguel	Vila Franca do Campo	Grandes destruições
1852-04-16	VII	S. Miguel	Santana	Várias mortes
1932-08-05	VIII	S. Miguel	Povoação	Vários feridos. Grandes destruições
1935-04-26	VIII	S. Miguel	Povoação	1 morto. Grandes destruições
1952-06-26	VIII	S. Miguel	Ribeira Quente	Grandes destruições

Assim, através da análise de documentos históricos e dados de sismicidade instrumental, é possível reconhecer que a ilha de São Miguel tem sido bastante afetada por fenómenos associados de forma direta ou indiretamente, a eventos sísmicos. Contudo, olhando para a figura 2.15, consegue-se observar que a atividade tem sido mais significativa ao nível dos vulcões poligenéticos ativos e das estruturas submarinas associadas, notando-se que no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos e no setor leste da ilha os índices de sismicidade são consideravelmente mais baixos.

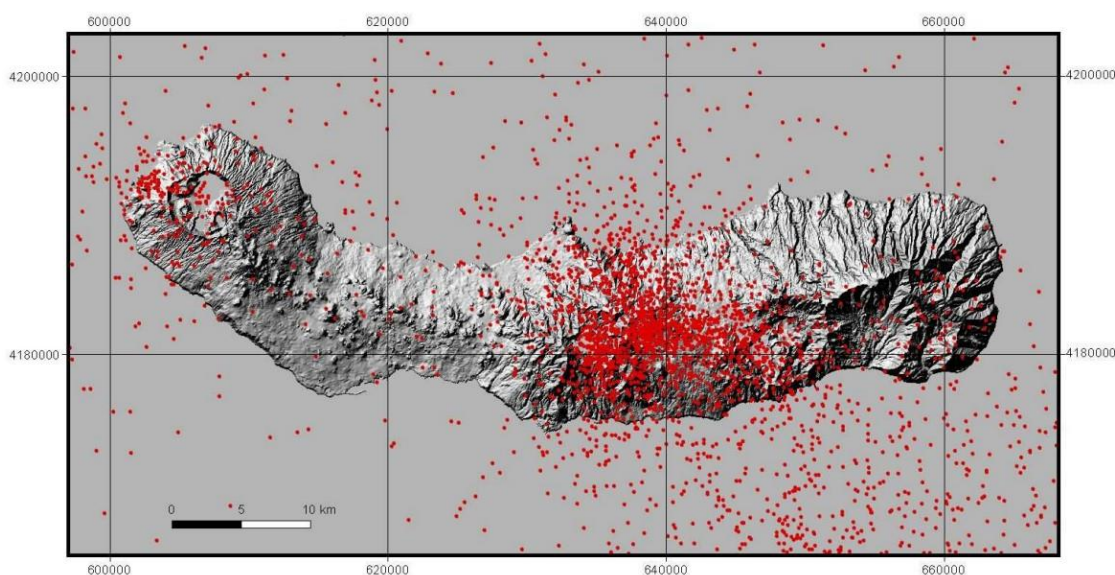


Figura 2.15 - Carta da sismicidade da ilha de São Miguel no período de 1980 a 2001 (CIVISA, dados não publicados; in: Medeiros, 2004).

Associado a este fenómeno, as erupções vulcânicas são outra das catástrofes naturais que afetam o arquipélago dos Açores. Também desde o seu povoamento, as ilhas açorianas têm sofrido diversos episódios vulcânicos (Figura 2.16) (Ferreira, 2000; Medeiros, 2004). As erupções históricas em terra variaram do estilo havaiano ao sub-pliniano, tendo por vezes um

carácter hidromagmático (Gaspar *et al.*, 2015b). As erupções basálticas (*s.l.*) que ocorreram nas ilhas de São Miguel (1563), Terceira (1761), São Jorge (1580 e 1808), Pico (1562-64, 1718 e 1729) e Faial (1672-73), foram relacionadas com sistemas vulcânicos fissurais ativos, com direções principais que refletem a tendência da tectónica regional NW-SE. A atividade explosiva traquítica (*s.l.*) foi registada em São Miguel, nas Furnas (1439-43 e 1630) e no Fogo (1563) (Cole *et al.*, 1995, 1999; Guest *et al.* 1995; Queiroz *et al.*, 2015; Wallenstein *et al.*, 2015), e incluiu fases freatomagmáticas causadas pela interação magma-água das lagoas das caldeiras. Domos traquíticos (*s.l.*) apareceram nas fases eruptivas tardias dos eventos do vulcão das Furnas e durante a erupção vulcaniana de 1652, no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos em São Miguel (Ferreira *et al.*, 2015).

Os relatos de erupções submarinas são escassos e para alguns, a única evidência é a rutura de cabos submarinos de telecomunicações (Chaves, 1960). As erupções submarinas observadas eram de carácter basáltico e por vezes criavam pequenas ilhotas com vida curta, como aconteceu nos eventos surtesianos de 1638, 1720 e 1811. A erupção submarina mais significativa ocorreu em 1957-58, perto do extremo noroeste da ilha do Faial, e formou o vulcão dos Capelinhos que se ligou à ilha numa fase final da erupção (Machado, 1959; Cole *et al.*, 2001). A erupção vulcânica mais recente nos Açores ocorreu entre dezembro de 1998 e abril de 2001 na Crista Submarina da Serreta, cerca de 10 km a oeste da Ilha Terceira (Gaspar *et al.*, 2003).

São destacadas, na ilha de São Miguel, as erupções de 1439-1443 e de 1630, localizadas no Vulcão das Furnas (Queiroz *et al.*, 1995), as de 1563, ocorridas, uma no interior da caldeira do Vulcão do Fogo e outra no flanco oeste do mesmo (Pico Queimado), estando situada na região onde os dois sistemas vulcânicos, Fogo e Região Fissural dos Picos, se interseam (Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000), e a de 1652, que teve lugar no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Ferreira, 2000) (Figura 2.17). As erupções de 1563 e 1630 foram acompanhadas de uma intensa atividade sísmica que resultaram em danos avultados e um elevado número de mortos.

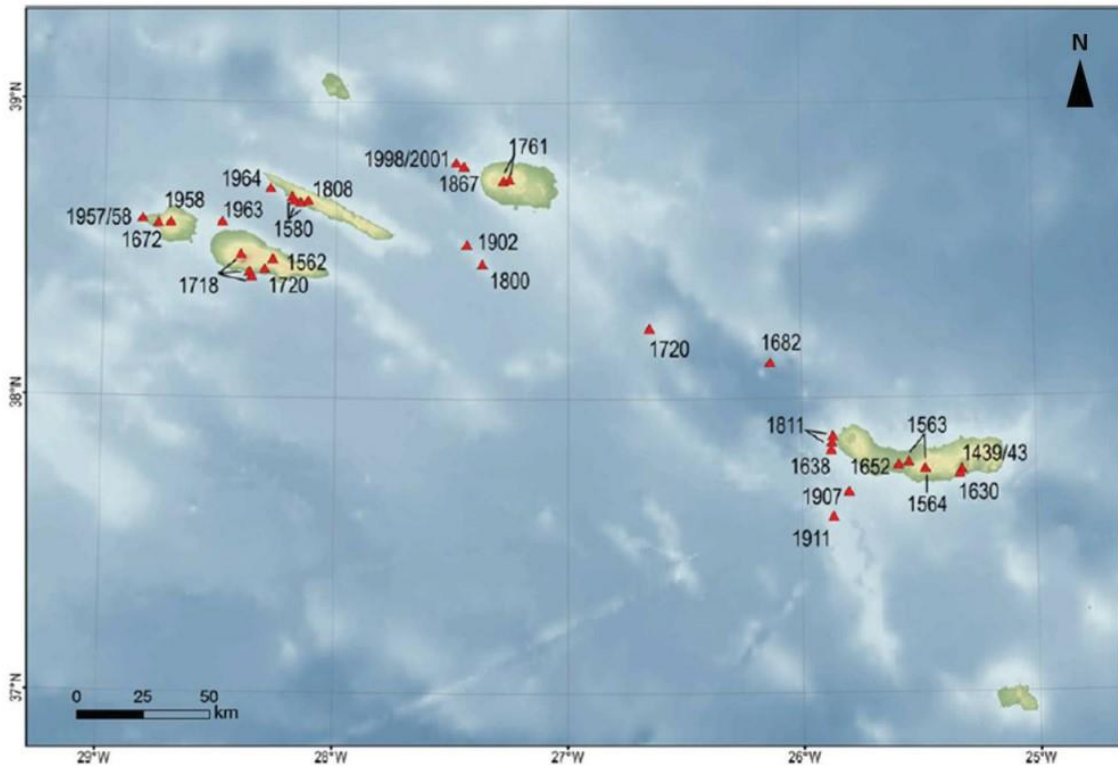


Figura 2.16 - Localização das erupções vulcânicas históricas conhecidas no arquipélago dos Açores (Gaspar et al, 2015b).

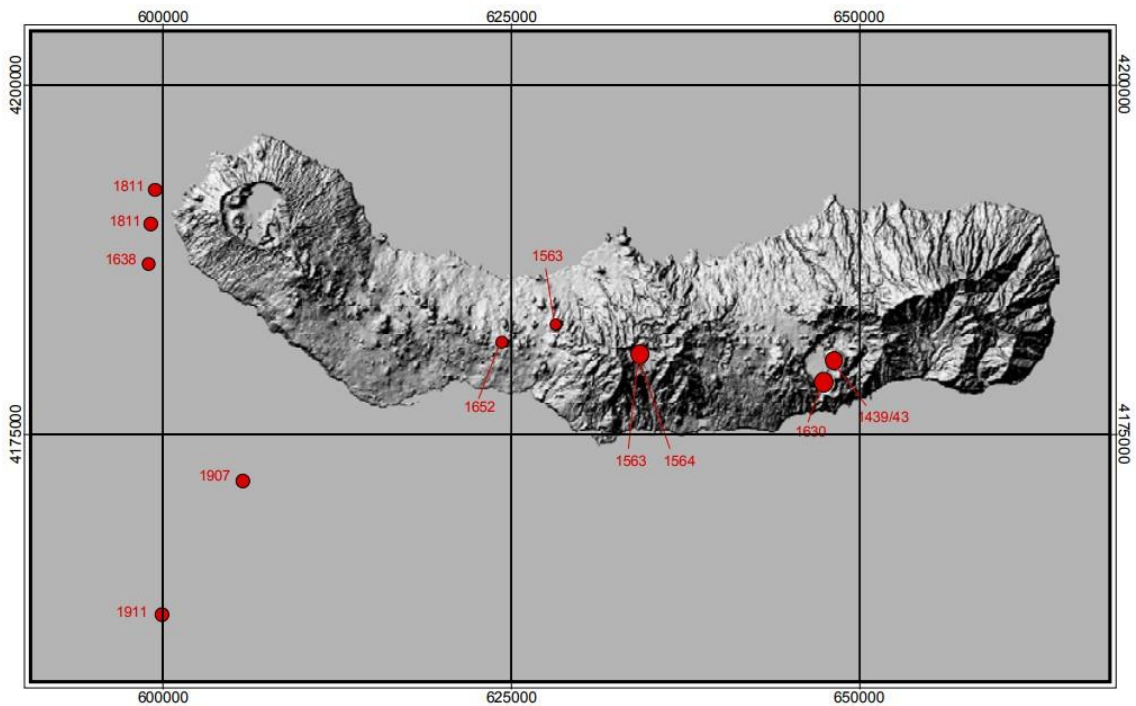


Figura 2.17 - Localização das erupções históricas da ilha de São Miguel e área circundante (Ferreira, 2000).

De acordo com Ferreira 2000 e Ferreira *et al.* (2015) ocorreram duas erupções históricas no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. A primeira erupção histórica deste sistema vulcânico, ocorreu a 2 de julho de 1563. Tal como referido anteriormente, esta erupção ocorreu quatro dias após um evento subpliniano hidromagmático, traquítico, ocorrido dentro da caldeira do Vulcão do Fogo (Wallenstein, 1999; Wallenstein *et al.*, 2015) e ocorreu no topo do Pico do Sapateiro, mais tarde designado Pico Queimado, um domo traquítico situado a cerca de 4 km a sudoeste da cidade da Ribeira Grande na zona de intersecção destes dois sistemas vulcânicos. Apesar da sua aparente relação com a atividade intracaldeira do Vulcão do Fogo, diversos autores incluem esta erupção basáltica no domínio do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Booth *et al.*, 1978; Moore 1991a; Ferreira, 2000). Esta erupção de natureza basáltica e de tipo havaiano (Wallenstein, 1999) foi alvo de análise por parte de vários autores (Agostinho, 1936, Zbyszewski, 1958, 1961; Weston, 1964, Booth *et al.*, 1978; Moore, 1991). Mais tarde, Wallenstein *et al.* (1998) e Wallenstein *et al.* (2015) reconstituíram a cartografia em pormenor dos produtos emitidos durante o evento, complementando os relatos históricos existentes com os novos elementos de campo (Figura 2.18). Esta erupção, do tipo fissural, desenvolveu-se ao longo de uma importante linha de fratura que atravessa o domo, com direção NW-SE, e alimentou uma fonte de lava que originou escórias, bombas e *spatter*, que se acumularam em volta da abertura. Durante os primeiros dias, a atividade caracterizou-se pela presença de fontes lávicas em erupção vindas do foco eruptivo principal, formando uma coluna eruptiva negra. Alguns dias mais tarde, desenvolveram-se as escoadas lávicas, onde a primeira seguiu pelos leitos dos ribeiros de Vilão e Ribeira Seca, transbordando este último perto do limite sul da vila da Ribeira Seca dois dias depois. Chegou ao mar na praia de Santa Bárbara no dia 7 de julho, percorrendo 4 km de distância, depois de fluir pela margem da escoada lávica do Pico Arde (Wallenstein, 1999). A outra escoada lávica fluiu para noroeste, em direção a Rabo de Peixe e tal como a anterior, foi canalizada, desta vez pela sua própria linha de falha de direção NW-SE, reativada no decurso da erupção (Wallenstein, 1999). O basalto produzido por esta erupção possui textura porfirítica com abundantes fenocristais de olivina inseridos em uma matriz de plagioclase, piroxena, olivina e minerais opacos (Wallenstein, 1999). A lava é rica em xenólitos e xenocristais derivados de sienito e menores quantidade de traquito que foram parcialmente fundidos, sendo uma característica distintiva desta lava (Wallenstein, 1998; Ferreira *et al.*, 2015).



Figura 2.18 – Vista do Google Earth com a distribuição das escoadas lávicas da erupção de 1563 (in: Wallenstein et al., 2015).

A segunda erupção, localizada a meio da zona mais estreita da ilha, a norte da vila da Lagoa, ocorreu entre os dois cones de escórias mais altos da área, o Pico do Paio e o Pico de João Ramos. A erupção teve início no dia 19 de outubro de 1652, continuando a sua atividade durante oito dias. Esta erupção foi precedida por uma intensa atividade sísmica com início nos dias 10 ou 12 de outubro, causando a destruição de uma parte da vila da Lagoa. O sismo de maior intensidade ocorreu a 18 de outubro e atingiu intensidade máxima VII (EMS-98). Após a erupção, a área ficou conhecida apenas por Pico do Fogo e os nomes originais deixaram de ser utilizados passando a serem designados por Fogo 1 (Pico de João Ramos) e Fogo 2 (Pico do Paio) (Ferreira *et al.*, 2015 e referências nele citadas).

Webster ([1821] 1982) descreveu a abertura do Pico do Fogo como um dos cones de escória mais conspícuos da ilha, tendo produzido durante a sua atividade eruptiva uma lava basáltica que fluiu para norte.

Webster ([1821] 1982), Friedlander (1929), Agostinho (1936), Zbyszewski *et al.* (1959), Weston (1964) e muitos outros propuseram que a erupção de 1652 foi basáltica e produziu o cone de escórias do Pico de João Ramos (Fogo 1) e a lava emitida fluiu para norte até chegar à aldeia de Rabo de Peixe. Mais tarde, Moore (1990, 1991a) também associou esta erupção ao centro eruptivo Fogo 1, complementando as interpretações anteriores ao cartografar dois fluxos de lava que fluem para sul até à costa oeste de Lagoa (Figura 2.19). Em contraste com as interpretações destes autores, Booth et al. (1978) concluíram que a erupção de 1652 foi um pequeno evento explosivo de estilo vulcaniano, de composição traquibasáltica e originou-se

na lateral oeste de um cone adjacente ao Fogo 1 (provavelmente o Pico do Paio, atualmente Fogo 2).

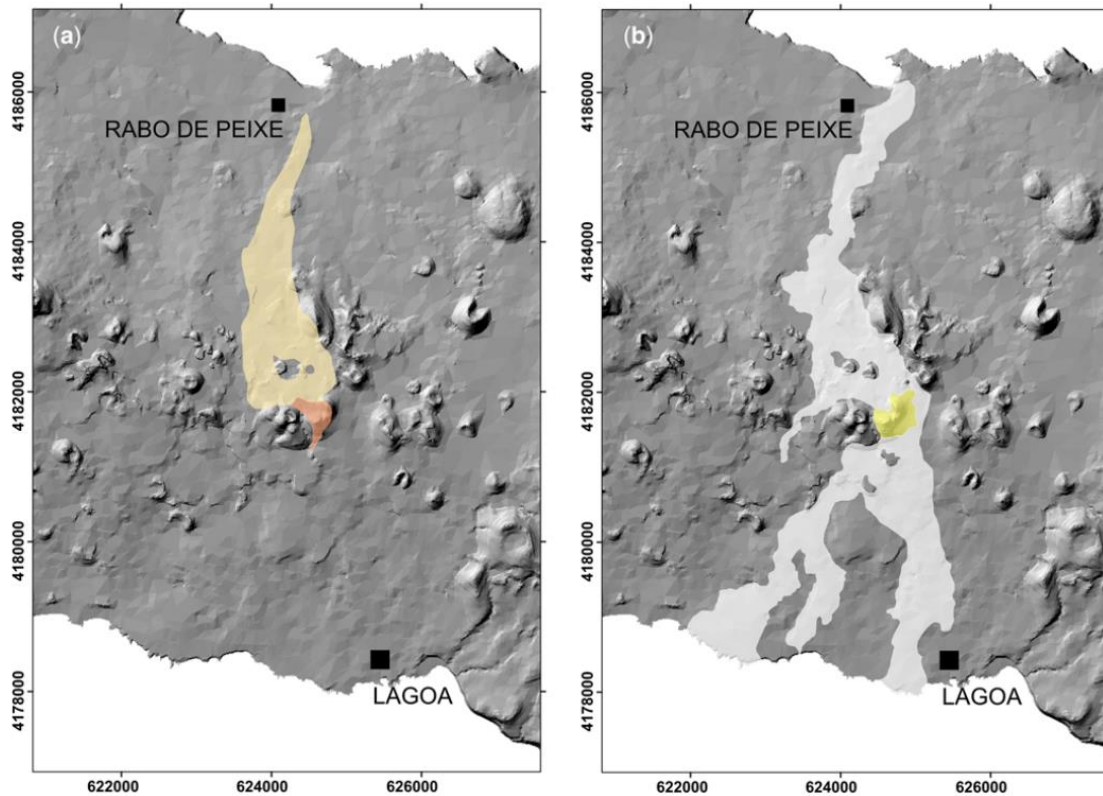


Figura 2.19 – Cartografia dos produtos vulcânicos considerados pertencentes à erupção de 1652, segundo interpretações de (a) Webster (1821/1982), Friedlander (1929), Agostinho (1936), Zbyszewski et al. (1959) e Weston (1964) e (b) Moore (1991a) (in: Ferreira et al., 2015).

Ferreira (2000) realizou estudos detalhados de evidências documentais, vulcanológicas e geomorfológicas e argumentou que a erupção de 1652 não estava relacionada com a construção do Pico de João Ramos (Fogo 1), mas sim, em vez disso, ao crescimento de três cúpulas de lava e *coulées* (Figura 2.20) associados ao longo de um alinhamento estrutural NW-SE (Ferreira *et al.*, 2015).

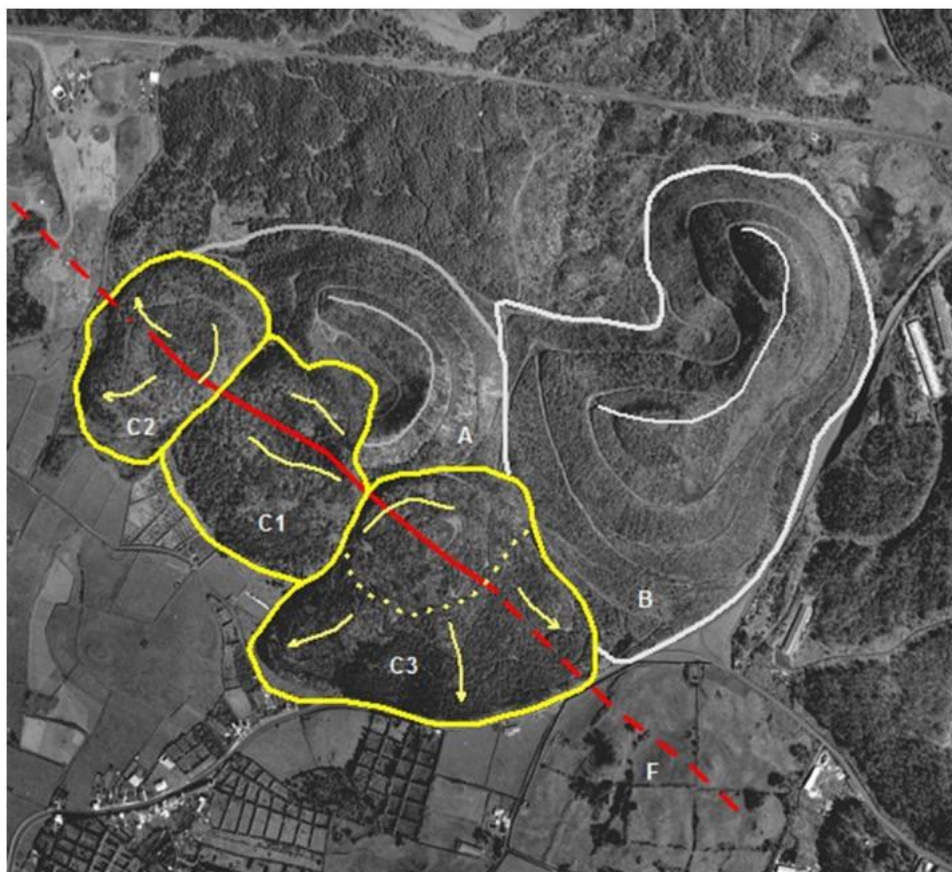


Figura 2.20 – Interpretação morfoestrutural da erupção de 1652. A – Pico do Paio (Fogo 2); B – Pico de João Ramos (Fogo 1); C2, C2 e C3 centros eruptivos da erupção de 1652; F – Falha associada à fissura eruptiva. As linhas finas identificam as crateras e as linhas mais grossas identificam a base das formas vulcânicas. As setas indicam a direção do fluxo das escoadas (coulées) (in: Ferreira et al., 2015).

Além da ocorrência de intensa atividade explosiva, nenhum documento histórico menciona o avanço de quaisquer fluxos de lava em direção à costa norte ou sul. Se tais acontecimentos ocorressem tal como foram cartografados por autores posteriores a Vasconcellos ([1652] (1982)), implicariam uma destruição considerável de áreas significativas de terras agrícolas e teriam impedido a deslocação de pessoas e mercadorias para as partes orientais da ilha. Todas as descrições desta erupção apontam para um evento localizado, caracterizado por explosões violentas que resultaram em nuvens densas escuras e grandes blocos (Vasconcellos [1652] 1982; Ferreira *et al.*, 2015).

Relatos históricos mostram claramente que a erupção de 1652 teve um carácter explosivo e produziu blocos e bombas, formando assim depósitos proximais e grandes quantidades de cinzas com dispersão apenas moderada. A abundância de cinzas indica um elevado grau de fragmentação do magma e não pode ser descartada a existência de alguma interação com águas subterrâneas. Todas essas características estão intimamente de acordo com uma erupção do tipo vulcaniano, conforme proposto anteriormente por Booth *et al.* (1978).

2.6 Vulcanismo secundário

No Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, não são conhecidas manifestações secundárias visíveis de vulcanismo (Ferreira *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2016). No entanto, trabalhos esporádicos realizados na cidade de Ponta Delgada (Silva *et al.*, 2014a; 2016) revelaram valores de radão no ar interior acima dos limites definidos na legislação nacional e valores no solo superiores aos valores de ruído de fundo definidos para zonas traquíticas como é o caso do Vulcão das Furnas (Silva, 2013; Silva *et al.*, 2015).

Silva *et al.* (2014a), efetuaram medições esporádicas das concentrações de radão, de dióxido de carbono (CO₂) e da temperatura no solo numa pequena área localizada na cidade de Ponta Delgada. No que se refere ao CO₂ e à temperatura do solo os valores máximos obtidos corresponderam respetivamente a 1,4 %vol. e 23,7 °C, isto é, correspondem a valores inferiores aos valores de ruído de fundo definidos para outros locais da ilha de São Miguel, como por exemplo, o Vulcão das Furnas, cujos valores de ruído de fundo para o CO₂ e a temperatura do solo correspondem, respetivamente, a 6 %vol. e a 25 °C (Silva, 2013). Uma situação diferente foi observada no que ao radão diz respeito. Neste caso, os valores máximos de concentração de radão medidos no solo 24300 Bq/m³, excediam o valor de 8000 Bq/m³ definido como valor de ruído de fundo para o Vulcão das Furnas (Silva, 2013).

No que se refere à concentração de radão no ar interior, foram efetuadas quer medições regulares, quer contínuas num edifício selecionado na cidade de Ponta Delgada (Silva *et al.*, 2014a; 2016). No que se refere às medições regulares, efetuadas em vários compartimentos do edifício, foram registados valores máximos de 1082 Bq/m³ (Silva *et al.*, 2014a). Por seu lado, nos ensaios de monitorização contínua realizados neste edifício foram medidos valores máximos de 2460 Bq/m³ (Silva *et al.*, 2014a) e de 6806 Bq/m³ (Silva *et al.*, 2016).

Assim, as concentrações de radão detetadas no ar interior acima do valor previsto na legislação nacional num edifício localizado na cidade de Ponta Delgada e os valores de radão no solo superiores aos valores de ruído de fundo definido para o Vulcão das Furnas (8000 Bq/m³; Silva, 2013; Silva *et al.*, 2015), realçam que zonas basálticas também devem ser tidas em conta no que diz respeito a um possível impacte do radão na saúde pública e reforçam a importância do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

3 Ensaio de Monitorização Contínua da Concentração de Radão no Ar Interior de um Edifício

3.1 Nota Prévia

Como referido no capítulo 1, a concentração de radão no ar interior dos edifícios pode variar de região para região, de acordo com as características geológicas do local. Contudo, num mesmo edifício podem também ocorrer, ao longo do tempo, variações dependentes de diversos fatores, como por exemplo, as condições meteorológicas.

Este capítulo tem como principais objetivos identificar e compreender as variações temporais observadas na concentração de radão no ar interior de edifícios e identificar quais os fatores externos que podem influenciar essa variação e o modo como essa influência é exercida. Para isso, um dos edifícios da cidade de Ponta Delgada foi selecionado para se efetuar um ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior. As séries temporais obtidas foram tratadas estatisticamente através da aplicação da análise espectral e da análise de regressão múltipla.

3.2 Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados

3.2.1 Equipamento e Amostragem

A monitorização contínua de radão no ar interior dos edifícios foi efetuada com recurso ao equipamento *Radon-Scout Plus*, fabricado pela empresa SARAD (Alemanha), que permite a deteção da concentração de radão no ar, sendo a amostragem efetuada por difusão. Integra, ainda, sensores que permitem fazer medições da temperatura do ar, da humidade relativa do ar e da pressão barométrica. Este aparelho tem um detetor semicondutor de silício e um medidor de recolha de alta tensão. Com uma capacidade de medição entre 1 e 10.000.000 Bq/m³, tem uma precisão de $\pm 20\%$ para 200 Bq/m³ e $\pm 10\%$ para 1000 Bq/m³ (SARAD GmbH, s. d.). A amostragem da concentração de radão foi realizada em ciclos de 60 minutos, num período compreendido entre 29 de junho de 2022 e 13 de outubro de 2023.

3.2.2 Local de Amostragem

Para a realização do ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior foi selecionado um edifício localizado no centro da cidade de Ponta Delgada. O local

selecionado para a amostragem corresponde a um compartimento localizado na cave do edifício (Foto 3.1). Esta cave corresponde a uma cave parcial em que apenas parte das paredes comunicam diretamente com o solo. Este local de amostragem foi selecionado: a) pela facilidade de acesso ao local sempre que necessário; b) pelo facto da ocupação do espaço ser pontual, pelo que a influência na ventilação do espaço por intervenção humana é também ela pontual.

O local de amostragem caracteriza-se por apresentar paredes construídas com blocos de betão furado. As paredes, o teto e o chão encontram-se revestidos por cimento e pintados com tinta, e é possível observar várias fraturas por toda a divisão. Este espaço não possui ventilação direta para o exterior, apesar da única porta existente comunicar para um corredor com ligação a uma porta que dá para o exterior e que normalmente se encontra aberta.



Foto 3.1 - Detetor de radão utilizado na monitorização contínua do local de amostragem definido.

3.2.3 Recolha e Análise Estatística dos Dados

Os dados da concentração de radão no ar interior do local de amostragem foram recolhidos uma vez por mês. Aos dados de radão e dos parâmetros ambientais obtidos pelo equipamento instalado, foram adicionados os dados referentes aos parâmetros meteorológicos obtidos pelas estações meteorológicas permanentes do IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) localizadas nas proximidades do local de amostragem. Estes dados são disponibilizados pelo IPMA na sua página web (<https://www.ipma.pt/pt/index.html>) e passaram a ser descarregados a partir de 13 de outubro de 2022. Os parâmetros da temperatura do ar, pluviosidade, humidade relativa do ar e velocidade do vento foram adquiridos pela estação meteorológica permanente situada no Observatório Afonso Chaves, localizada a cerca de 200 metros do local de amostragem. O parâmetro da pressão barométrica foi, no entanto, adquirido

na estação meteorológica permanente localizada no aeroporto João Paulo II, localizada a cerca de 4 km do local de amostragem. A necessidade de recorrer a dados desta estação mais distante do ponto de amostragem deve-se a uma avaria no sensor da pressão barométrica da estação localizada no Observatório Afonso Chaves.

De forma a compreender a influência estatística destes fatores externos na variação da concentração de radão no ar interior do edifício foi aplicada a análise de regressão múltipla às séries temporais de dados obtidas, através do uso do método *Stepwise* (Draper & Smith, 1981; Freund & Wilson, 2006). Para esse propósito, foi utilizado o *software* SPSS (*Statistical Packages for the Social Sciences*), versão 28. Nesta análise, o logaritmo da concentração de radão no ar interior foi considerado a variável dependente e os parâmetros meteorológicos e ambientais em ponderação, foram considerados as variáveis independentes.

A aplicação da análise de regressão múltipla a séries temporais de dados requer que a população em análise apresente uma distribuição normal. No entanto, os dados geoquímicos, geralmente não seguem esta distribuição, sendo, por vezes, necessário recorrer a uma conversão logarítmica de forma a que a distribuição dos dados convertidos se aproxime da normal (Draper & Smith, 1981). Também neste caso, constatou-se que os dados obtidos da concentração de radão no ar interior não seguem uma distribuição normal, pelo que se procedeu à transformação logarítmica dos dados e observou-se que estes apresentam uma distribuição próxima da normal (Figura 3.1). Assim, para a aplicação da análise de regressão múltipla foram utilizados os dados da concentração de radão log-transformados.

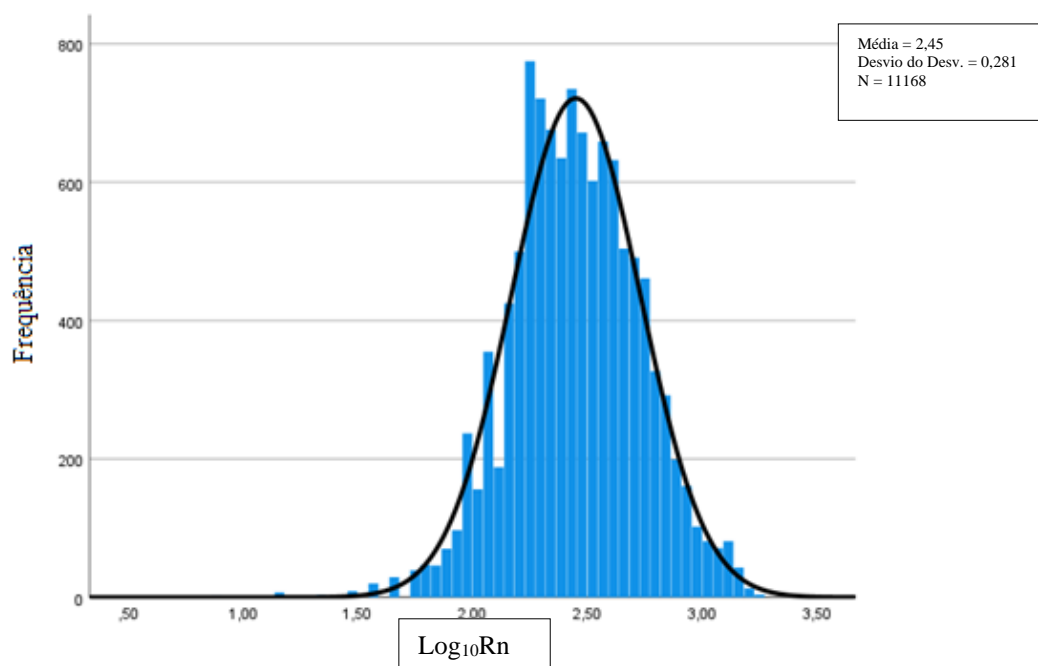


Figura 3.1 - Histograma dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior no local de amostragem.

No modelo de regressão múltipla aplicado foram somente consideradas as variáveis independentes com significância de acordo com o teste t de *student* e que promovem um aumento do R^2 ajustado superior a 1%. O teste t de *student* possibilita comprovar se cada variável independente é estatisticamente significativa na explicação da variável dependente, sendo rejeitada a hipótese de cada variável independente com um nível de significância selecionado superior a 0,01. Estes critérios foram aplicados em trabalhos anteriores quer no que se refere a séries temporais de radão (Silva, 2013), quer de dióxido de carbono (Viveiros, 2010). O R^2 ajustado fornece informações sobre a capacidade explicativa do modelo. Foi ainda aplicado ao modelo, o teste F de *Snedcor* que permite a validação das variáveis introduzidas no modelo como um todo (Draper & Smith, 1981; Freund & Wilson, 1998).

Uma vez que a aplicação da análise de regressão múltipla requer a não existência de multicolinearidade entre as variáveis independentes, o cálculo do VIF (*Variance Inflation Factor*), permite aferir a existência desta entre as variáveis independentes, excluindo-se as que apresentam um VIF superior a 10 (Freund & Wilson, 1998).

O modelo final aplicado é aquele que apresenta maior poder explicativo para as oscilações da variável dependente, respeitando todos os requisitos anteriormente descritos, sendo construído de acordo com a equação que se segue (Equação 3.1, Freund & Wilson, 2006):

$$(3.1) \quad Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_mX_m + \epsilon_i, \\ i = 1, 2 \dots n$$

Em que:

Y = variável dependente;

X = variável independente;

B_0 = constante, valor médio de Y quando X é zero;

B = declive da reta;

ϵ_i = variável aleatória residual que descreve os efeitos em Y_i não explicados por X_i .

Às séries temporais de dados obtidas foi também aplicada a análise espectral através do uso do *software Tsoft*, versão 2.2.15, concebido por uma equipa do *Royal Observatory of Belgium* (Van Camp & Vauterin, 2005; Vauterin & Van Camp, 2011; Manual *Tsoft*, <http://seismologie.oma.be/TSOFT/tsoft.html>). Este *software* permite a análise de variações em todo o tipo de séries temporais como, por exemplo, marés terrestres, eventos sísmicos e parâmetros meteorológicos (Van Camp & Vauterin, 2005). No âmbito da frequência, este tipo

de análise, permite identificar quer variações de curto período através do espectro obtido (variações cíclicas diárias), quer variações de longo período através do espectrograma (variações sazonais). Este tipo de análise possibilita ainda identificar relações de amplitude, atraso entre variáveis e coeficientes de correlação entre diferentes frequências (*Transfer function*) (Van Camp & Vauterin, 2005; Silva, 2013).

No âmbito das frequências, no software *Tsoft*, o filtro aplicado corresponde à FFT (*Fast Fourier Transform*), que decompõe sinais periódicos em funções de senos e cossenos (Harris, 1978). Com a aplicação deste filtro, cada ponto do sinal filtrado não é independente, mas depende de todos os pontos do canal. Assim, os resultados são influenciados não só pela presença de interrupções horárias na sequência de dados, mas também pelo limite no tempo da série (Van Camp & Vauterin, 2005). Deste modo, teve-se em consideração a presença de interrupções na sequência de dados nas séries temporais em análise. Quando essa interrupção era de uma ou duas horas de dados, a mesma foi interpolada pelo cálculo da diferença entre os valores anterior e posterior da respetiva série de dados a dividir por 2 ou 3, respetivamente. Os valores obtidos foram somados ao valor anterior da série de dados até preencher as interrupções existentes. Nas situações onde se verificaram três ou mais horas de interrupção de dados, foram retiradas as 24 horas associadas a esse dia.

Assim, para as séries de dados obtidas foram calculados i) os espectros, com base na FFT, tendo sido selecionado um intervalo de incremento de 3600 segundos e a função *Hanning* que permite forçar os pontos das extremidades para zero; ii) o espectrograma, utilizando a aplicação *Moving Window Spectrum*, sendo o número de pontos entre transformações de 128 e o número de pontos a transformar de 512 e iii) as correlações e atrasos entre as variáveis, tendo sido aplicada a *Transfer function* (FFT), com blocos de tamanho 256.

3.3 Apresentação dos resultados

O ensaio de monitorização da concentração de radão no ar interior no edifício selecionado, foi efetuado no período compreendido entre 29 de junho de 2022 e 13 de outubro de 2023. A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão pode ser observada na figura 3.2.

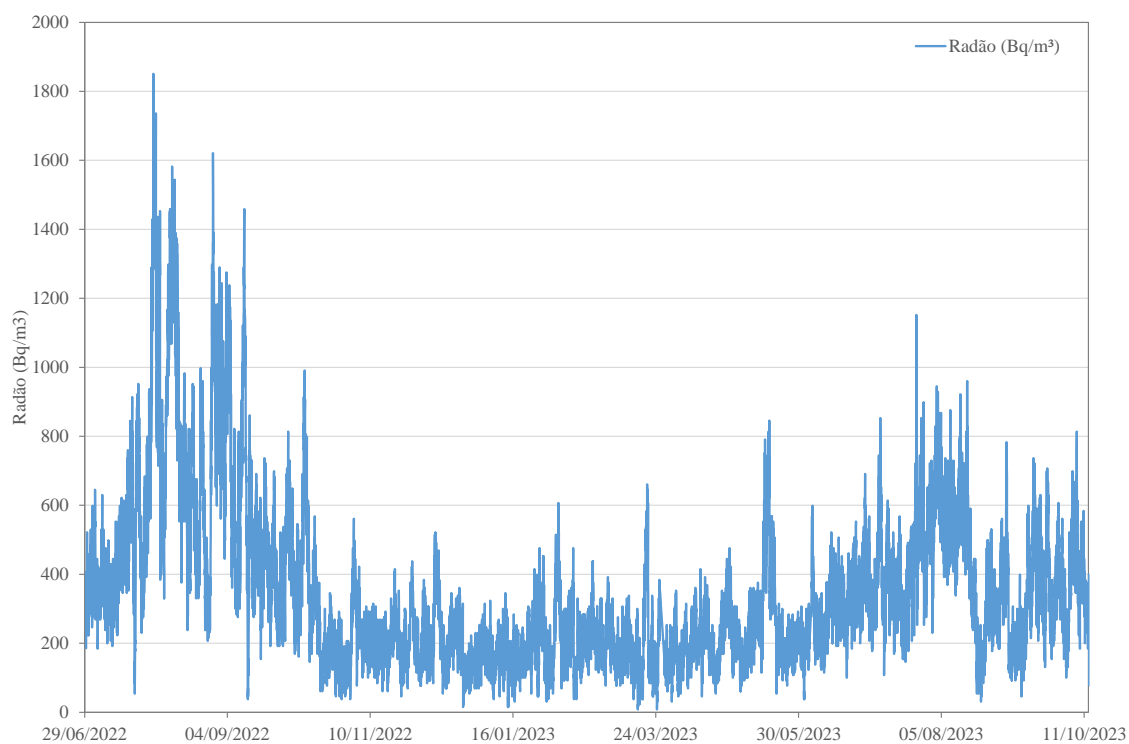


Figura 3.2 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício selecionado.

Na tabela 3.1 está sintetizada a informação referente à estatística descritiva dos dados da concentração de radão obtidos, bem como dos parâmetros meteorológicos analisados para o período em estudo.

Tabela 3.1 - Estatística descritiva dos dados da concentração de radão e dos parâmetros ambientais obtidos no local de amostragem para o período total de amostragem e dos parâmetros meteorológicos registados no local e nas estações permanentes pertencentes ao IPMA, localizadas no Observatório Afonso Chaves (AC) e no aeroporto (Aero) para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
Radão (Bq/m ³)	345,6	238,7	276,0	8,0	1851,0	11168
Temperatura no ar interior (°C)	20,7	2,2	20,5	17,0	25,0	11168
Humidade relativa no ar interior (%)	76,2	3,1	77,0	67,0	82,0	11168
Pressão barométrica no ar interior (hPa)	1016,6	9,2	1017,0	990,0	1052,0	11168
Humidade relativa no ar exterior (%)	78,9	11,3	80,0	40,0	98,0	8513
Precipitação (mm)	0,1	0,6	0,0	0,0	16,0	8513
Temperatura no ar exterior (°C)	18,4	3,7	18,2	7,6	29,3	8513
Velocidade do vento (km/h)	7,0	4,0	6,5	0,4	31,7	8513
Pressão barométrica no ar exterior (hPa)	1020,1	8,2	1020,6	993,7	1041,2	8513
Diferencial de humidade (%)	-3,3	11,1	-4,0	-27,0	37,0	8513
Diferencial de temperatura (°C)	1,7	2,4	1,6	-6,3	10,1	8513
Diferencial de pressão (hPa)	-4,1	3,7	-5,0	-24,3	19,2	8513

De forma a tentar identificar quais dos parâmetros externos em análise têm influência nas variações da concentração de radão no ar interior neste local de amostragem e de que modo essa influência é realizada, foi efetuada através de gráficos (Anexo I), a análise comparativa entre as variações temporais da concentração de radão e de cada variável analisada, incluindo os diferenciais de humidade, temperatura e pressão barométrica. Estes diferenciais correspondem, respetivamente, à diferença da humidade relativa, da temperatura e da pressão barométrica medidas no interior e no exterior do edifício amostrado.

Após a comparação gráfica efetuada, as variáveis que aparentam exercer influência sobre a concentração de radão no ar interior neste local são a humidade relativa no ar interior, a temperatura e a pressão barométrica no ar exterior. Para uma melhor observação das relações existentes foram eleitos determinados períodos de amostragem. A humidade no ar interior (Figura 3.3), a temperatura e a pressão barométrica no ar exterior (Figuras 3.4 e 3.5) apresentam uma relação direta com a concentração de radão no ar interior deste edifício.

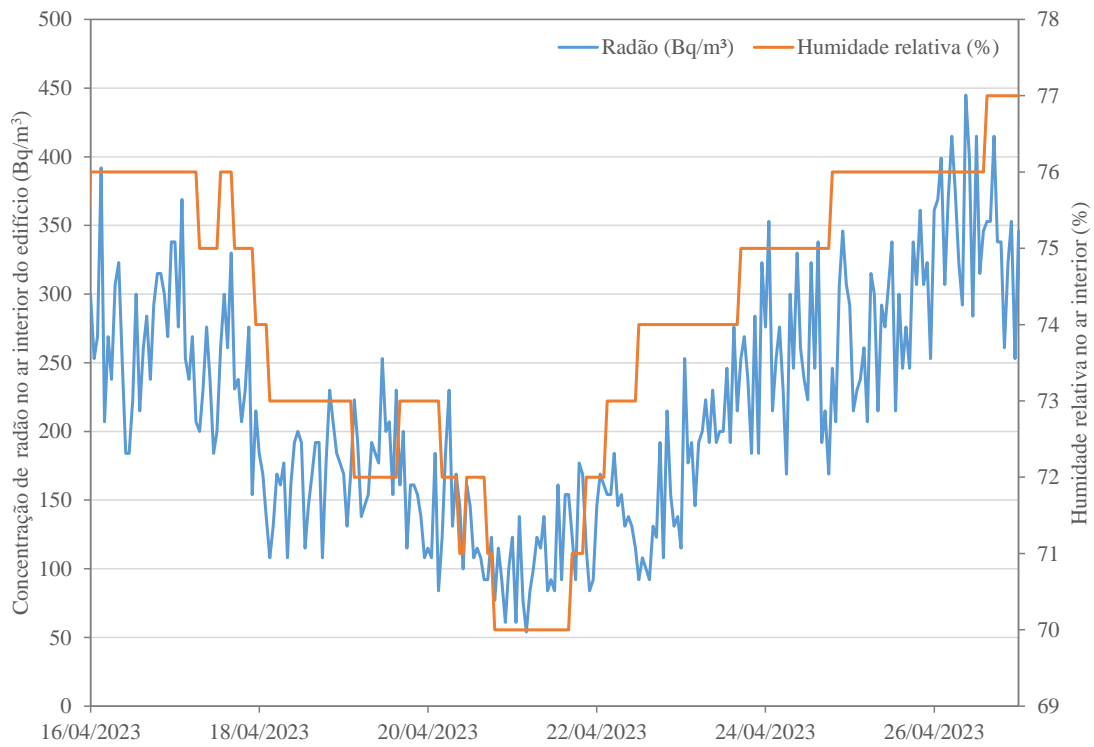


Figura 3.3 - Variação temporal da concentração de radão e da humidade relativa no ar interior do edifício para o período compreendido entre 16 e 27 de abril de 2023.

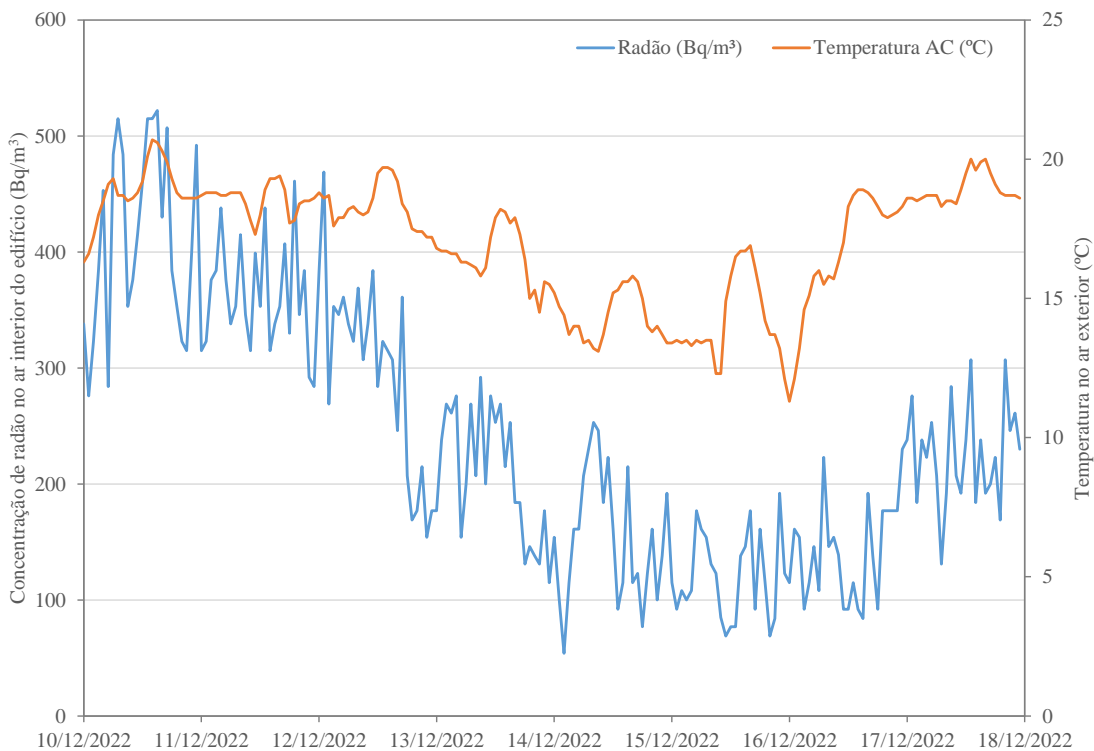


Figura 3.4 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da temperatura no ar exterior para o período compreendido entre 10 e 18 de dezembro de 2022.

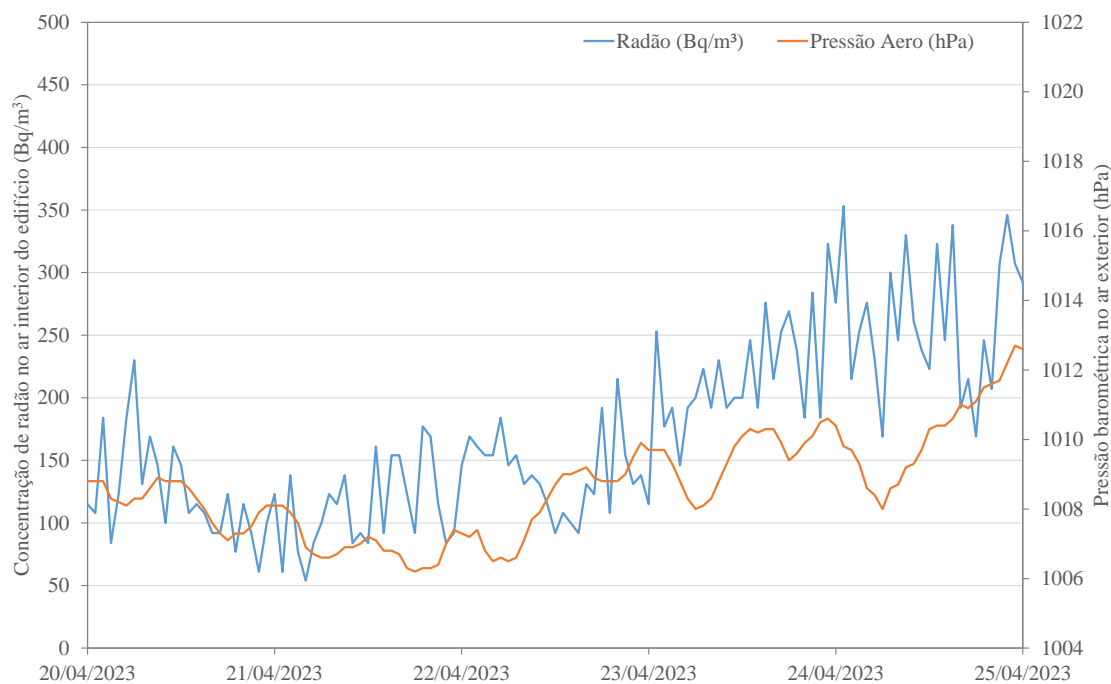


Figura 3.5 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da pressão barométrica no ar exterior para o período compreendido entre 20 e 25 de abril de 2023.

De forma a tentar confirmar estas relações foram calculados os coeficientes de correlação de *Pearson* entre as várias variáveis em estudo e foi aplicada a análise de regressão múltipla. Na tabela 3.2 estão sintetizados os resultados obtidos para o cálculo dos coeficientes de correlação de *Pearson*.

Tabela 3.2 - Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo. (13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023) (AC – Estação meteorológica do Observatório Afonso Chaves; Aero – Estação meteorológica do aeroporto).

Variáveis	Log ₁₀ ²²² Rn no ar interior	Temperatura no ar interior	Humidade relativa no ar interior	Pressão barométrica no ar interior	Humidade relativa no ar exterior AC	Precipitação AC	Temperatura no ar exterior AC	Velocidade do vento AC	Pressão barométrica no ar exterior Aero	Diferencial de humidade	Diferencial de temperatura	Diferencial de pressão
Log ₁₀ ²²² Rn no ar interior	1,000	0,498	0,560	0,036	0,150	-0,017	0,523	-0,082	0,068	0,003	-0,358	-0,054
Temperatura no ar interior	0,498	1,000	0,595	-0,130	-0,112	-0,035	0,790	-0,089	-0,055	0,278	-0,317	-0,230
Humidade relativa no ar interior	0,560	0,595	1,000	-0,126	0,188	-0,015	0,680	0,037	-0,064	0,085	-0,514	-0,200
Pressão barométrica no ar interior	0,036	-0,130	-0,126	1,000	-0,195	-0,133	-0,130	-0,136	0,937	0,164	0,083	0,637
Humidade relativa no ar exterior AC	0,150	-0,112	0,188	-0,195	1,000	0,152	-0,143	-0,112	-0,209	-0,963	0,120	-0,068
Precipitação AC	-0,017	-0,035	0,015	-0,133	0,152	1,000	-0,053	0,137	-0,159	-0,159	0,050	-0,009
Temperatura no ar exterior AC	0,523	0,790	0,680	-0,130	-0,143	-0,053	1,000	0,100	-0,062	0,333	-0,831	-0,215
Velocidade do vento AC	-0,082	-0,089	-0,037	-0,136	-0,112	0,137	0,100	1,000	-0,183	0,103	-0,236	0,036
Pressão barométrica no ar exterior Aero	0,068	-0,055	-0,064	0,937	-0,209	-0,159	-0,062	-0,183	1,000	0,194	0,046	0,328
Diferencial de humidade	0,003	0,278	0,085	0,164	-0,963	-0,159	0,333	0,103	0,194	1,000	-0,264	0,014
Diferencial de temperatura	-0,358	-0,317	-0,514	0,083	0,120	0,050	-0,831	-0,236	0,046	-0,264	1,000	0,125
Diferencial de pressão	-0,054	-0,230	-0,200	0,637	-0,068	-0,009	-0,215	0,036	0,328	0,014	0,125	1,000

A análise de regressão múltipla foi aplicada ao conjunto de dados adquiridos no período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023, uma vez que este período corresponde a um ano completo de dados de todas as variáveis em análise. Através da análise de regressão múltipla aplicada aos dados da concentração de radão log-transformados foi possível aferir que no modelo proposto, ou seja, no modelo com maior poder explicativo e que respeita os requisitos descritos no ponto 3.2.3, as variáveis com significância estatística são a temperatura, a humidade relativa e a pressão barométrica no ar interior (Tabela 3.3). De acordo

com o R^2 ajustado do modelo proposto, estas variáveis explicam 37,0% do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior do edifício. De acordo com o sinal do coeficiente β , a humidade relativa do ar, a temperatura do ar e a pressão barométrica exercem uma influência positiva nas variações deste gás.

Uma vez que as variáveis, temperatura, humidade relativa e pressão barométrica entram em análise de três modos diferentes (interior, exterior e diferencial), para a elaboração do modelo de regressão múltipla apenas se considerou o modo dessa variável que apresenta maior poder explicativo.

No que diz respeito aos coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 3.2), estes estão em concordância com os resultados obtidos pela regressão no que se refere às variáveis humidade e temperatura no ar interior; sendo que a terceira variável com maior correlação com os dados de radão log-transformados corresponde à temperatura no ar exterior.

Tabela 3.3 - Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

Variável independente	Coeficiente B	Erro padrão B	Coeficiente β	Teste t	Sign. teste t*	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-3,766	0,226		-16,649	< 0,001		
Humidade relativa no ar interior	0,033	0,001	0,417	38,887	< 0,001	0,313	1,553
Temperatura no ar interior	0,030	0,001	0,267	24,858	< 0,001	0,042	1,554
Pressão barométrica no ar interior	0,003	0,000	0,123	14,110	< 0,001	0,015	1,021

Variável dependente: Log_{10} da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação

Número total de observações: 8512

Somatório do R^2 ajustado: 0,370

Teste F: 199,096

< 0,001**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A análise espectral foi aplicada a toda a série temporal da concentração de radão no ar interior no ponto de amostragem, ou seja, essa análise foi aplicada para o período compreendido entre 29 de junho de 2022 e 13 de outubro de 2023. O espectro resultante da aplicação da análise espectral permitiu identificar variações cíclicas diárias associadas a um e dois ciclos por dia (Figura 3.6). O espectrograma possibilitou também a identificação de variações cíclicas associadas a um e dois ciclos por dia (cpd), permitindo também a identificação de variações sazonais associadas a dois ciclos por dia, que surgem de forma mais intensa no espectrograma nos meses de verão (Figura 3.7).

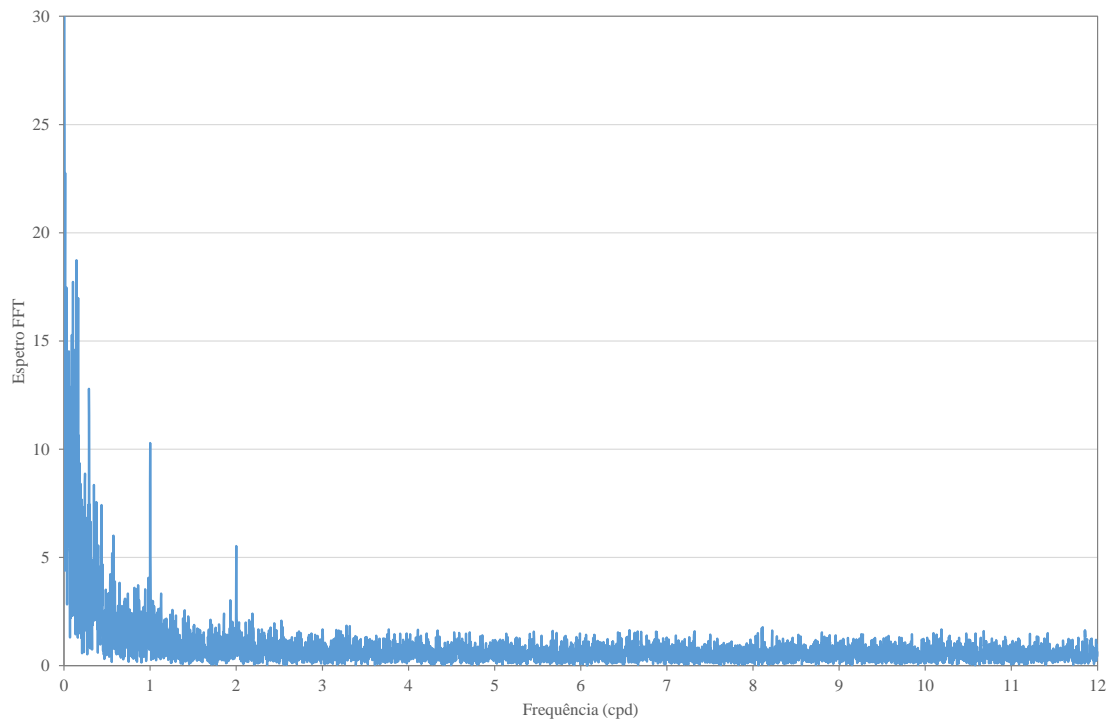


Figura 3.6 - Espectro de amplitudes da concentração de radão no ar interior, no edifício amostrado, para o período de 29 de junho de 2022 a 13 de outubro de 2023 cpd = ciclo por dia.

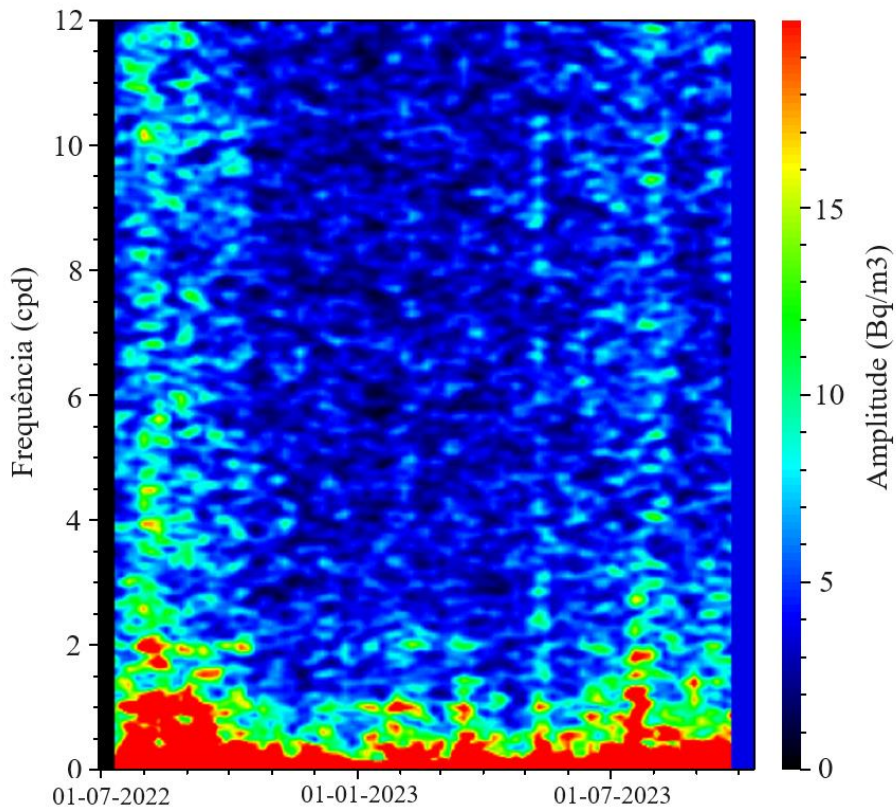


Figura 3.7 - Espectrograma da concentração de radão no ar interior, no edifício amostrado, para o período de 29 de junho de 2022 a 13 de outubro de 2023.

Para correlacionar as variações cíclicas diárias identificadas no espectro relativo ao radão com as variáveis cíclicas associadas às restantes variáveis em análise, foi necessário efetuar a análise espectral para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023, ou seja, para o período em que existe dados de todas as variáveis. Para tal, recorreu-se à função *Transfer*, (FFT), tendo como critério de seleção apenas os coeficientes de correlação superiores a 0,4 (no Anexo II encontram-se os espectros destas variáveis). Nesta análise, a velocidade do vento e a temperatura no ar exterior surgem como os parâmetros meteorológicos com correlação superior a 0,4 com a concentração de radão no ar interior associada a um ciclo por dia. A humidade relativa, a pressão barométrica e a temperatura no ar exterior surgem como as variáveis associadas a dois ciclos por dia (Tabela 3.4). Para o período em análise, a concentração de radão apresenta, para um ciclo por dia, um atraso de cerca de 9 horas relativamente à velocidade do vento e à temperatura no ar exterior. Para dois ciclos por dia, apresenta um atraso de 1, 4 e 5 horas relativamente à humidade relativa, à pressão barométrica e à temperatura no ar exterior, respetivamente.

Tabela 3.4 – Correlação e atraso entre a concentração de radão no ar interior e os parâmetros meteorológicos registados nas estações do IPMA, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

Outras variáveis	Concentração de radão no ar interior (Bq/m ³)		Atraso (h)	
	1 cpd	2 cpd	para 1 cpd	para 2 cpd
Velocidade do vento AC (km/h)	0,40	-	≈9	-
Temperatura no ar exterior AC (°C)	0,42	0,46	≈9	≈5
Humidade relativa no ar exterior AC (%)	-	0,47	-	≈1
Pressão barométrica no ar exterior Aero (hpa)	-	0,48	-	≈4

Atendendo que a série temporal de dados se estende por um período superior a um ano (29 de junho de 2022 a 13 de outubro de 2023) foi efetuada a análise das baixas frequências com o objetivo de detetar comportamentos sazonais. A análise do espectro obtido (Figura 3.8) permitiu identificar variações periódicas associadas a 341, 137 e 76 dias.

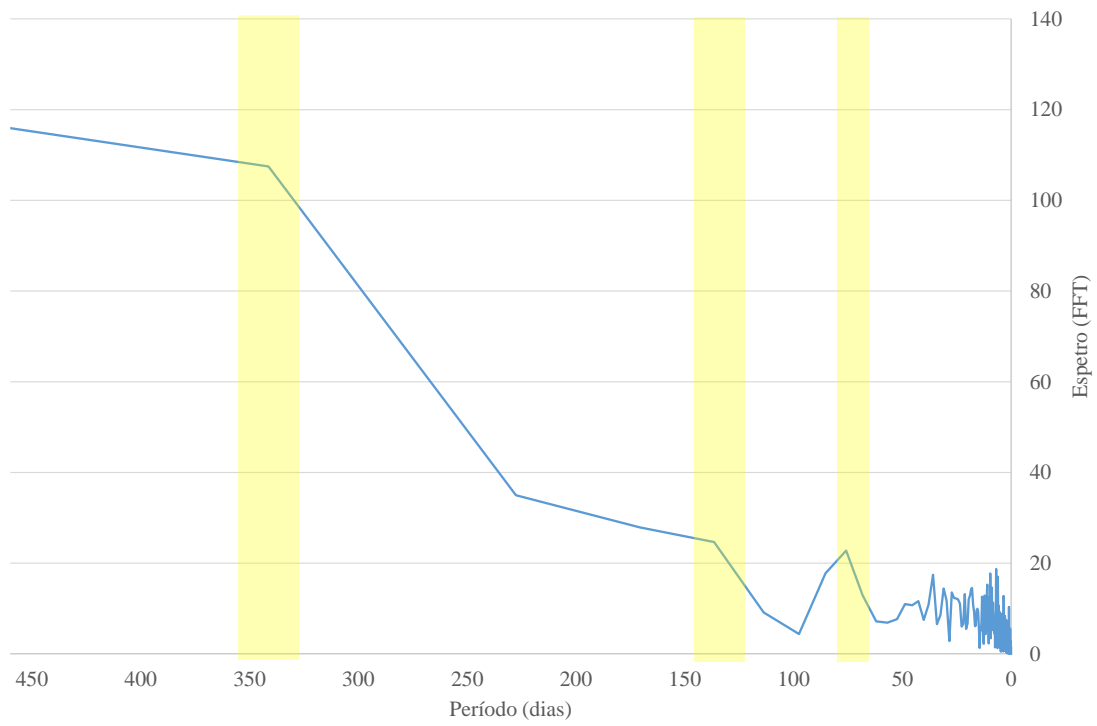


Figura 3.8 – Espectro de amplitudes de baixas frequências da concentração de radão no ar interior do edifício. A sombreado amarelo estão assinalados os incrementos associados a 341, 137 e 76 dias.

3.4 Discussão

3.4.1 Análise de Regressão Múltipla

3.4.1.1 Modelos, Dados Previstos e Resíduos

A aplicação da análise de regressão múltipla às séries de dados do ponto de amostragem permitiu a elaboração de uma equação que corresponde ao modelo proposto para o local amostrado. A equação 3.2 evidencia o modelo de regressão proposto. Esta análise possibilitou ainda a representação gráfica da variação temporal dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior previstos por esse modelo e dos resíduos calculados pela diferença entre os dados log-transformados observados e os previstos (Figura 3.8). Os resíduos correspondem às variações, que não sendo explicadas pelo modelo, podem estar associadas a parâmetros que não estão a ser analisados.

(3.2)

$$\log_{10} {}^{222}\text{Rn} = (-3,766) + 0,033 \times H + 0,030 \times T + 0,003 \times P$$

Em que:

H = Humidade relativa no ar interior

T = Temperatura no ar interior

P = Pressão barométrica no ar interior

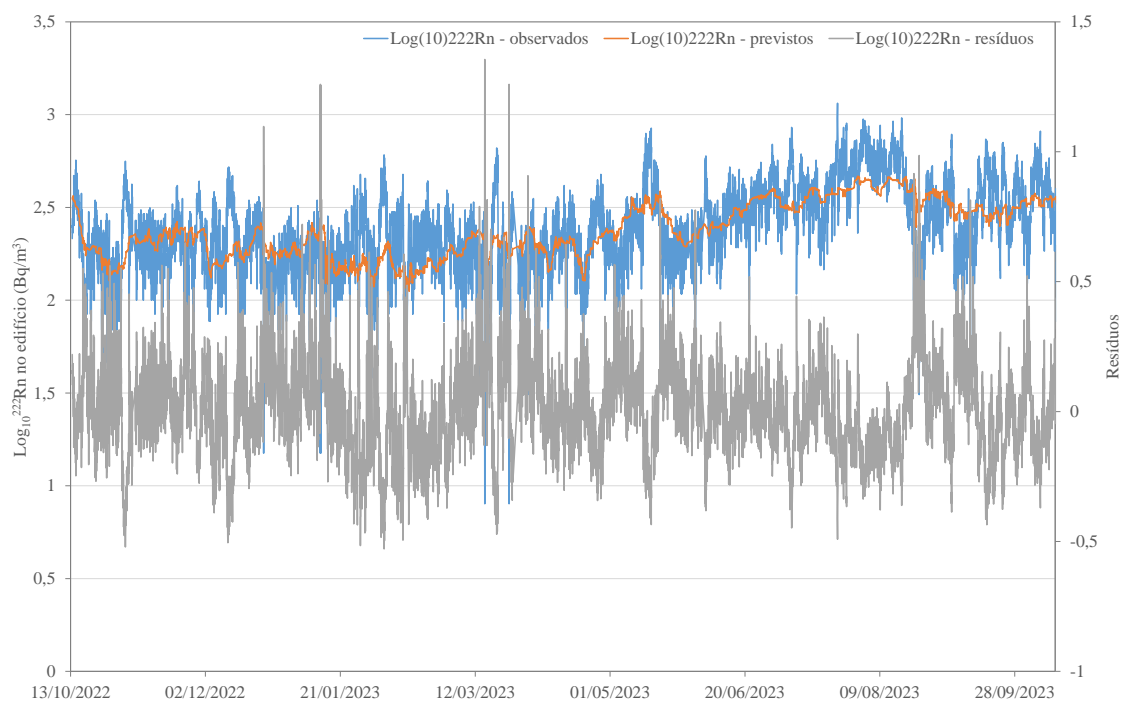


Figura 3.9 - Variação temporal dos dados log₁₀-transformados da concentração de radão no ar interior observados no local de amostragem, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 3.2 e dos respectivos resíduos calculados.

A aplicação da análise de regressão múltipla efetuada nos dados log-transformados da concentração de radão neste edifício permitiu verificar que a variável com maior poder explicativo (31,3%) é a humidade no ar interior (Tabela 3.3). O modelo proposto explica cerca de 37,0% do total das variações dos dados de radão log-transformados. A humidade relativa do ar interior exerce uma influência positiva sobre as variações dos dados log-transformados da concentração de radão (Figura 3.10). A temperatura (Figura 3.11) e a pressão barométrica no ar interior (Figura 3.12) também exercem uma influência positiva sobre este conjunto de dados e explicam, respetivamente, 4,2% e 1,5% do total das variações (Tabela 3.3).

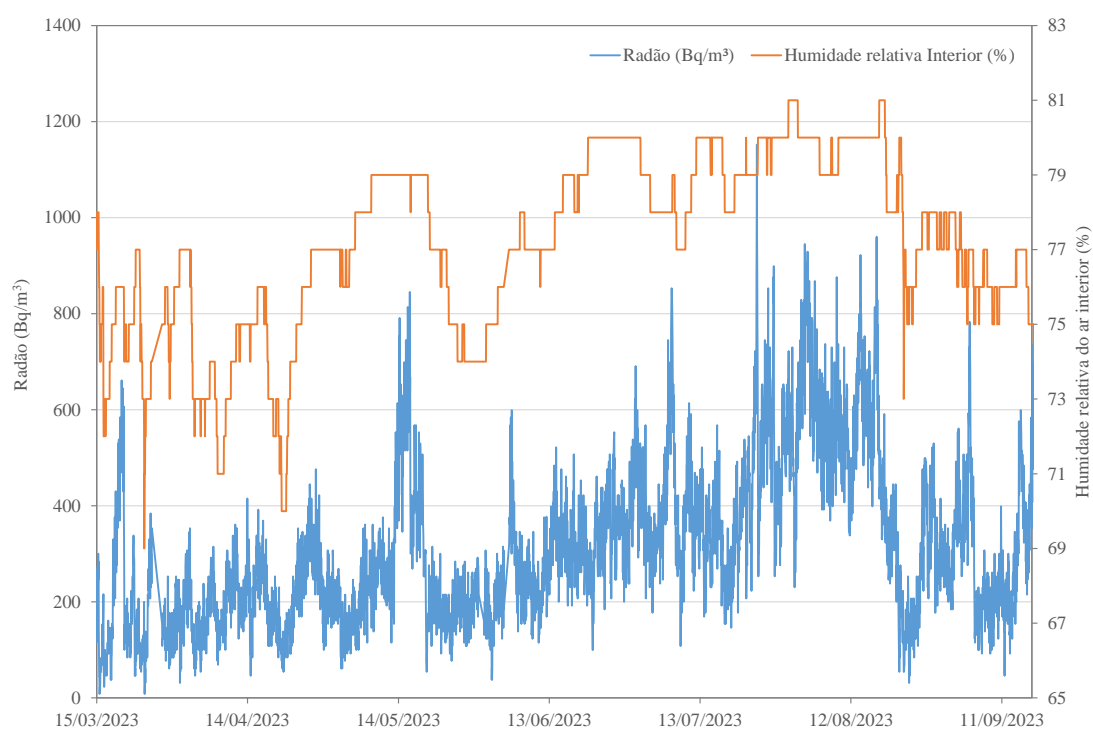


Figura 3.10 - Variação temporal da concentração de radão e da humidade relativa no ar interior no local de amostragem para o período compreendido entre 15 de março e 18 de setembro de 2023.

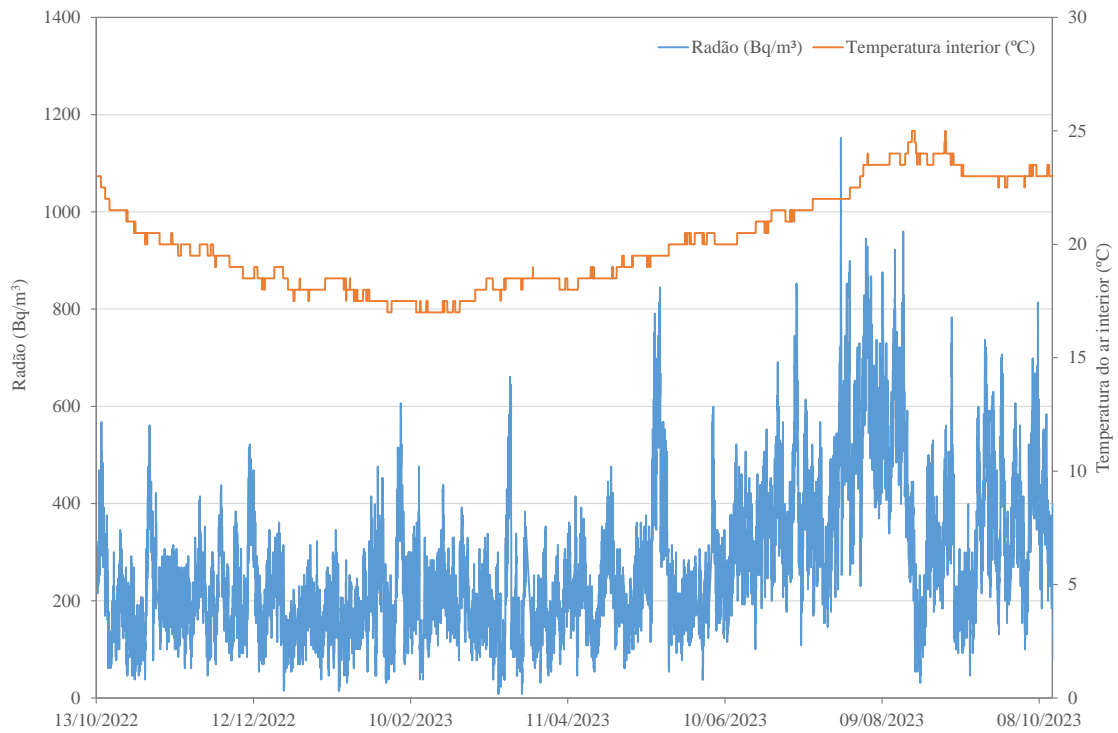


Figura 3.11 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da temperatura no ar interior para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 8 de outubro de 2023.

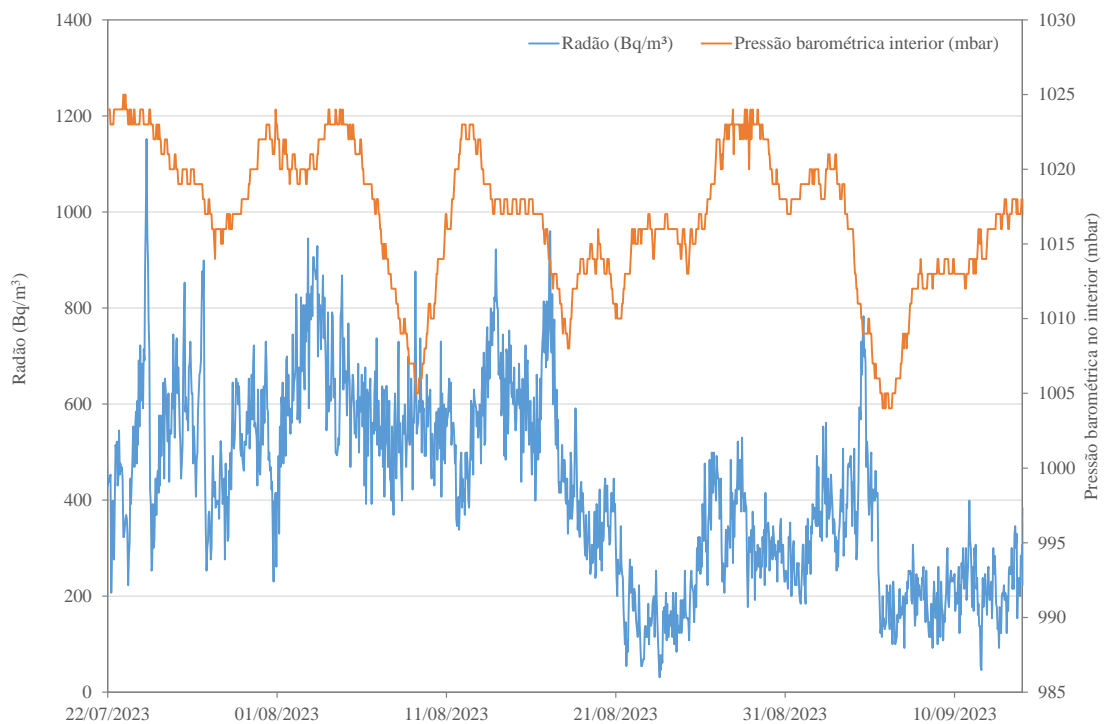


Figura 3.12 - Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da pressão barométrica no ar interior para o período compreendido entre 22 de julho e 13 de outubro de 2023.

3.4.2 Análise Espetral

A análise espectral aplicada permitiu verificar a existência de variações diárias e sazonais, tendo sido identificados incrementos associados quer a altas e baixas frequências (Tabela 3.5). As variações diárias da concentração de radão no ar interior do edifício estão associadas a um e dois ciclos por dia. Em estudos realizados no Reino Unido (Groves-Kirby *et al.*, 2006) e em Portugal (Neves *et al.*, 2009) foram descritas variações cíclicas diárias de séries temporais da concentração de radão no ar interior de edifícios relacionadas com a presença de um e/ou dois ciclos por dia.

Tabela 3.5 – Principais frequências identificadas na série temporal da concentração de radão no ar interior e fenómenos com periodicidade semelhante: a) Han & Han, 2002 e referências nele citadas; b) Schureman, 1971.

Periodicidade (dias)	Fenómeno com periodicidade semelhante
~ 341	Translação da Terra (ciclo anual ~ 365 dias)
~ 137	Translação da Terra (ciclo semianual ~ 183 dias)
~ 76	Ciclo lunar (múltiplo da rotação lunar ~ 28 dias) ^{a)} Ciclo solar (múltiplo da rotação solar ~ 26 dias) ^{a)}
1	Marés terrestres - Ciclo diário (~ 24 horas) ^{b)}
0,5	Marés terrestres - Semiciclo diário (~ 12 horas) ^{b)}

Como referido anteriormente, o período amostrado evidencia uma variação cíclica associada a um a dois ciclos por dia (Figura 3.13), tendo sido calculados os coeficientes de correlação e os atrasos entre as variações da concentração de radão no ar interior e os parâmetros meteorológicos em análise. No conjunto de dados, as variações da concentração de radão no ar interior, em períodos de maior estabilidade das condições meteorológicas para um ciclo por dia, apresentam valores mínimos ao final da tarde, entre as 18:00 e as 20:00 horas, e valores máximos de manhã, entre as 07:00 e as 09:00 horas. Para dois ciclos por dias, os valores mínimos de manhã registam-se, entre as 09:00 e as 11:00 horas, e de tarde, entre as 18:00 e as 20:00 horas, e valores máximos são observados de manhã, entre as 07:00 e as 09:00 horas, e ao início da tarde, entre as 13:00 e as 16:00 horas. A análise aplicada correlaciona as variações associadas a um ciclo por dia às variáveis da velocidade do vento e temperatura no ar exterior, e as variações associadas a dois ciclos por dia à pressão barométrica, temperatura e humidade relativa no ar exterior. As variações de radão associadas a um ciclo por dia apresentam atrasos de 9 horas em relação às variáveis temperatura do ar exterior e velocidade do vento, sendo a temperatura do ar a variável com maior correlação (Figura 3.14 e Tabela 3.4). No que se refere às variações cíclicas associadas a dois ciclos por dia, a variável que apresenta maior correlação corresponde à pressão barométrica no ar exterior. A pressão barométrica apresenta uma relação direta com a concentração de radão e um atraso de 4 horas (Figura 3.15). Associadas ainda a

dois ciclos por dia e com atrasos de 1 e 5 horas identificam-se as variáveis humidade relativa e temperatura no ar exterior, respetivamente.

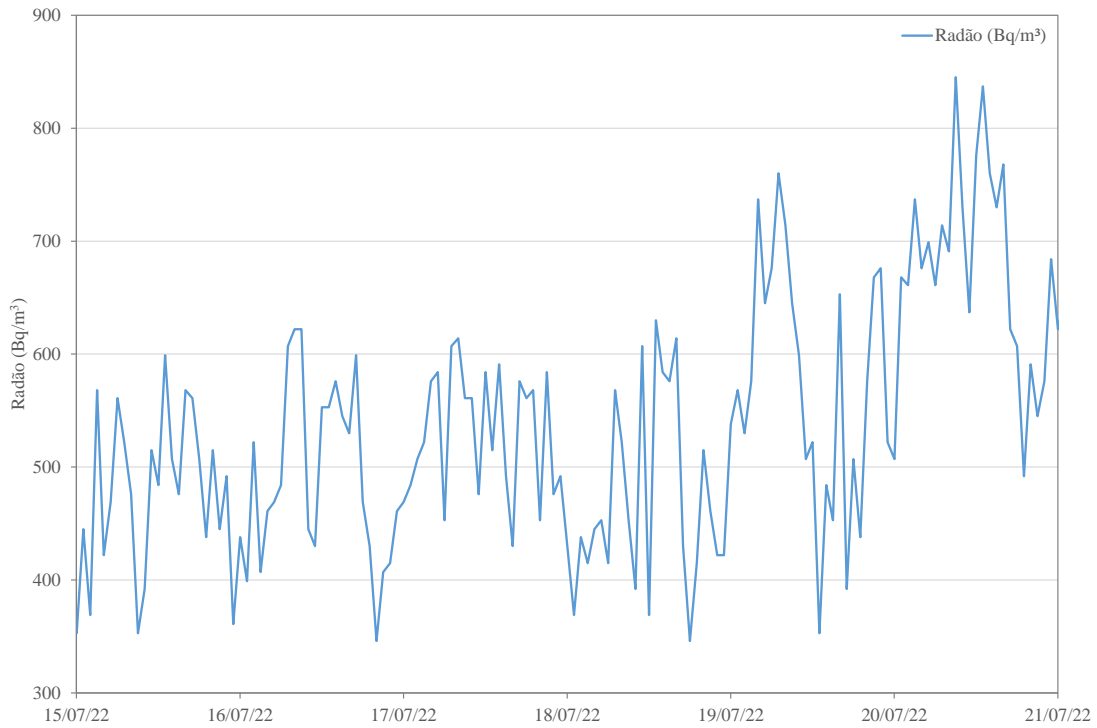


Figura 3.13 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior no local de amostragem para o período compreendido entre 15 e 21 de julho de 2022. Variações cíclicas associadas a um e dois ciclos por dia.

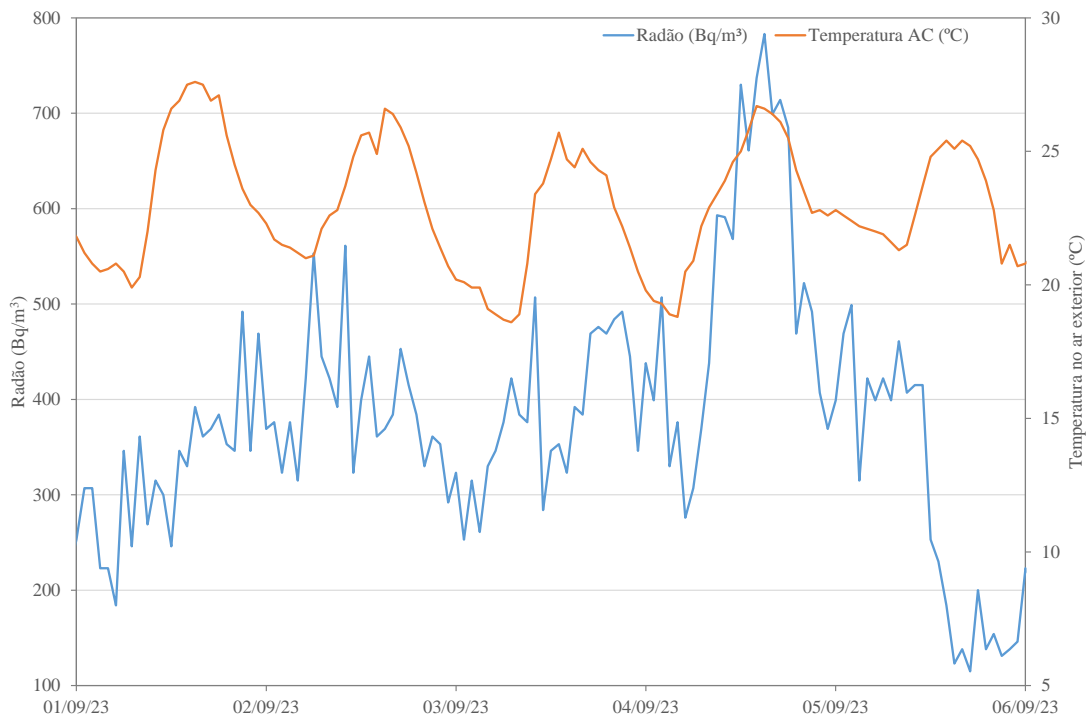


Figura 3.14 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior e temperatura no ar exterior para o período compreendido entre 1 e 6 de setembro de 2023.

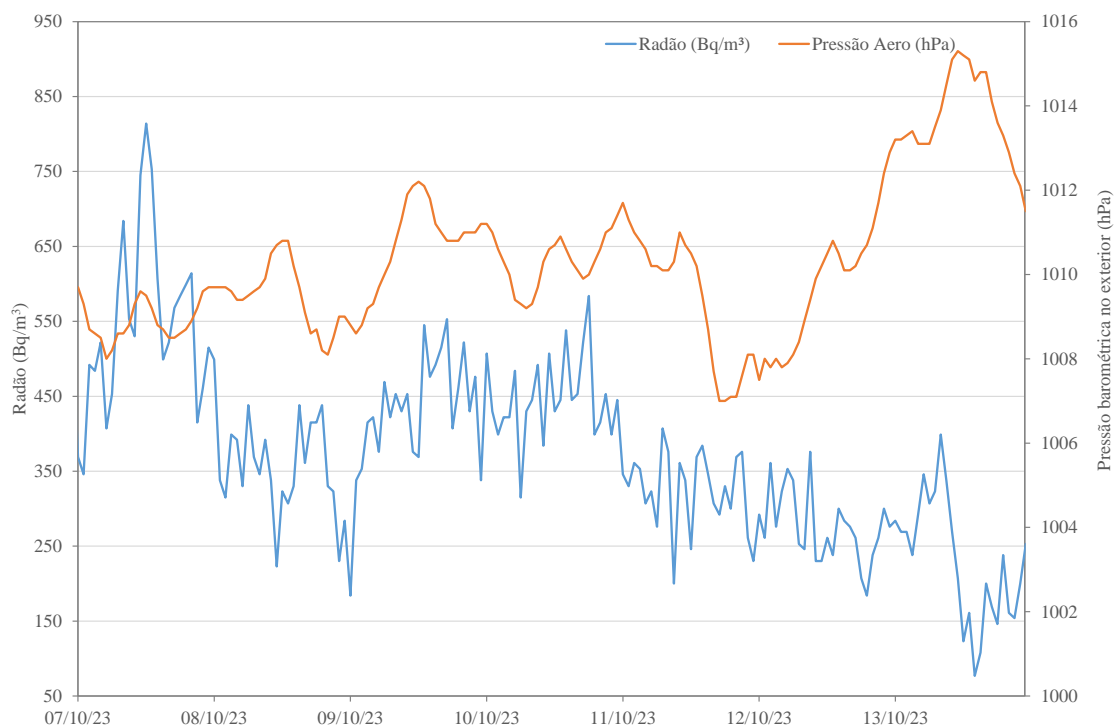


Figura 3.15 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior e da pressão barométrica no ar exterior para o período compreendido entre 7 e 13 de outubro de 2023.

A análise de baixas frequências permitiu a identificação de um ciclo anual e de um ciclo semianual (~ 341 dias e ~ 137 dias, respectivamente). As diferenças observadas entre os ciclos identificados e os dias associados aos ciclos anuais (~ 365 dias) e semianuais (~ 183 dias) deverão resultar do reduzido período de dados em análise, pouco mais de um ano. Um período de amostragem que se prolongue por vários anos poderá originar uma aproximação entre o número de dias obtidos nos ciclos anual e semianual identificados na análise espectral e os dias que compõem os ciclos anuais e semianuais. Foram ainda identificados ciclos de 76 dias que poderão estar associados aos períodos de rotação da Lua e do Sol, respectivamente. Silva (2013) também observou um cenário semelhante para as séries temporais de radão no ar interior, no que diz respeito ao ciclo anual.

Observando o gráfico que ilustra a variação temporal das médias mensais da concentração de radão no ar interior (Figura 3.16) verifica-se a existência de uma variação sazonal em que os valores obtidos são superiores nos meses de verão em relação aos valores obtidos para os meses de inverno. O espectrograma elaborado na análise espectral confirmou ainda a presença de uma variação sazonal que se prende com a ocorrência de variações cíclicas associadas a dois ciclos por dia nos meses de verão (Figura 3.7).

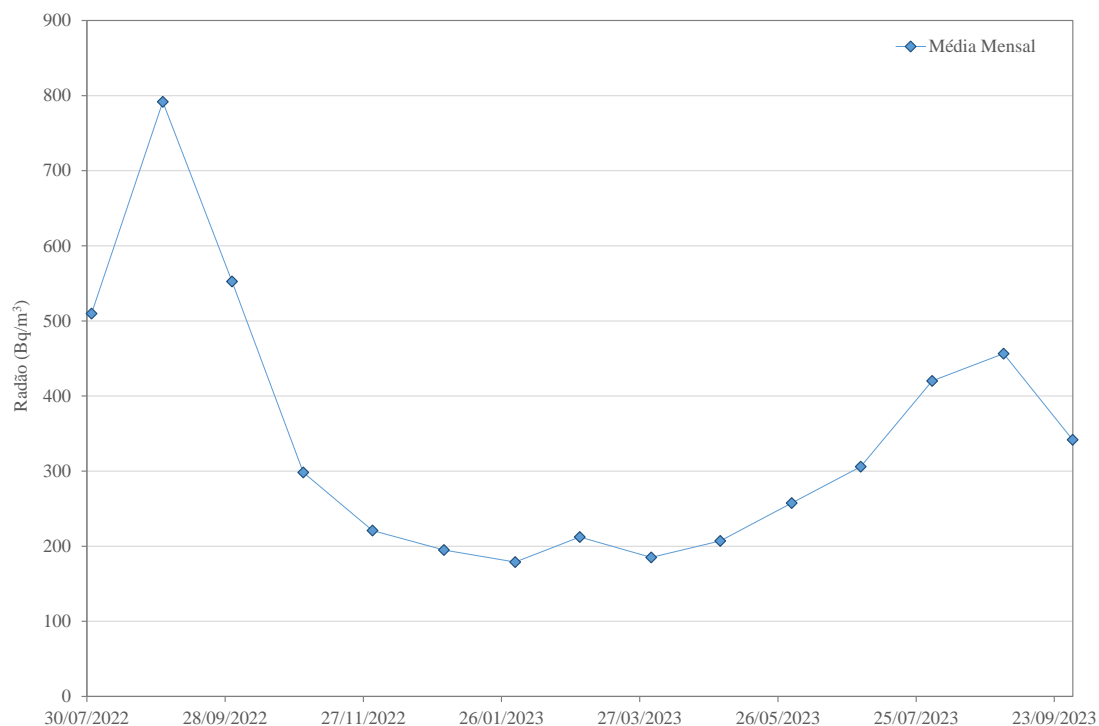


Figura 3.16 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado para o período compreendido entre julho de 2022 e setembro de 2023.

A variação sazonal observada, isto é, valores de concentração de radão mais elevados nos meses de verão quando comparados com os meses de inverno, é contrária ao observado em trabalhos realizados em diferentes locais (Singh *et al.*, 2005; Bossew & Lettner, 2007; Rao & Sengupta, 2010). Nestes trabalhos, as concentrações de radão são mais elevadas no ar interior de edifícios nos meses de inverno e mais baixas nos meses de verão.

No compartimento do edifício amostrado onde foi colocado o equipamento não existia ventilação direta com o exterior. No entanto, este espaço está conectado a um corredor que possui uma porta que se encontra normalmente aberta. Assim, embora a porta da divisão onde o equipamento esteve instalado permanecesse fechada a maior parte do tempo, a ventilação do edifício pode influenciar a concentração de radão no ar interior no compartimento monitorizado, especialmente em dias de vento mais forte, podendo assim contribuir para o padrão sazonal observado com valores de concentração de radão mais elevados nos meses de verão. Um comportamento semelhante foi também descrito em diversos trabalhos (Hubbard *et al.*, 1992; Di Carlo *et al.* (2023) e Spasić & Gulan, 2022) Nestes estudos em que várias habitações foram monitorizadas ao longo de diversos anos, foi observado um comportamento sazonal inverso tendo sido registadas as concentrações de radão superiores no verão em comparação com as registadas no inverno. Esse comportamento foi associado, por um lado, ao incremento da

temperatura externa que potencia incremento da concentração de radão e por outro, a uma ventilação mais eficaz destes edifícios nos meses de inverno.

3.4.3 Saúde Pública

No período em análise os valores obtidos da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado ultrapassaram por diversas vezes os valores recomendados quer pela OMS, quer pela legislação nacional. A OMS recomenda uma média anual de 100 Bq/m^3 e, na sua impossibilidade, que não ultrapasse os 300 Bq/m^3 , valor este que coincide com o definido pela legislação nacional (D.L. nº108/2018 Artº. 154). Visto que os valores expressos quer pela OMS, quer pela legislação nacional são referentes a médias anuais, a análise foi dividida em dois períodos de modo a abranger todos os dados, criando-se dois períodos de um ano. O primeiro período anual, compreendido entre 29 de junho de 2022 a 29 de junho de 2023, teve início no dia inicial de amostragem e neste período o valor máximo registado de 1851 Bq/m^3 é cerca de 6 vezes superior ao limite legislado, sendo o valor médio, $328,4 \text{ Bq/m}^3$, também superior ao limite previsto na legislação. O segundo período anual selecionado corresponde àquele para o qual existe registo de todas as variáveis consideradas neste estudo e corresponde ao período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023. Durante esse período o valor máximo registado (1152 Bq/m^3) é cerca de 4 vezes superior ao limite legislado, sendo o valor médio ($271,5 \text{ Bq/m}^3$) superior ao limite recomendado pela OMS, mas inferior ao limite legislado. Para o período total de amostragem registou-se um valor médio de $345,6 \text{ Bq/m}^3$.

As variações dos parâmetros meteorológicos, tal como mencionado anteriormente, exercem uma influência importante nas variações da concentração de radão no ar interior. Variações significativas destes parâmetros podem levar também a variações bastante consideráveis na concentração de radão afetando a qualidade do ar interior.

Nas figuras 3.17 e 3.18 denota-se que, nos meses de julho, agosto, setembro e até meio de outubro a maior parte dos valores obtidos encontram-se acima do limite estabelecido, enquanto no resto do ano vão ocorrendo alguns picos que ultrapassam esse limite.

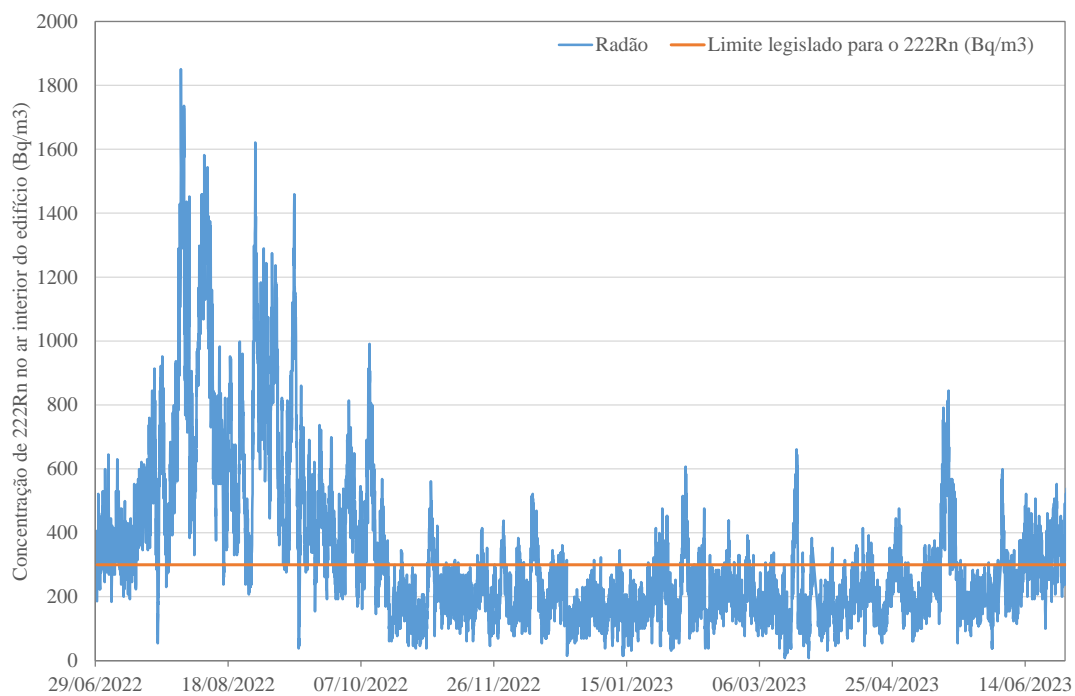


Figura 3.17 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado para o período compreendido entre 29 de junho de 2022 e 29 de junho de 2023. A linha laranja representa o nível de referência previsto na legislação nacional.

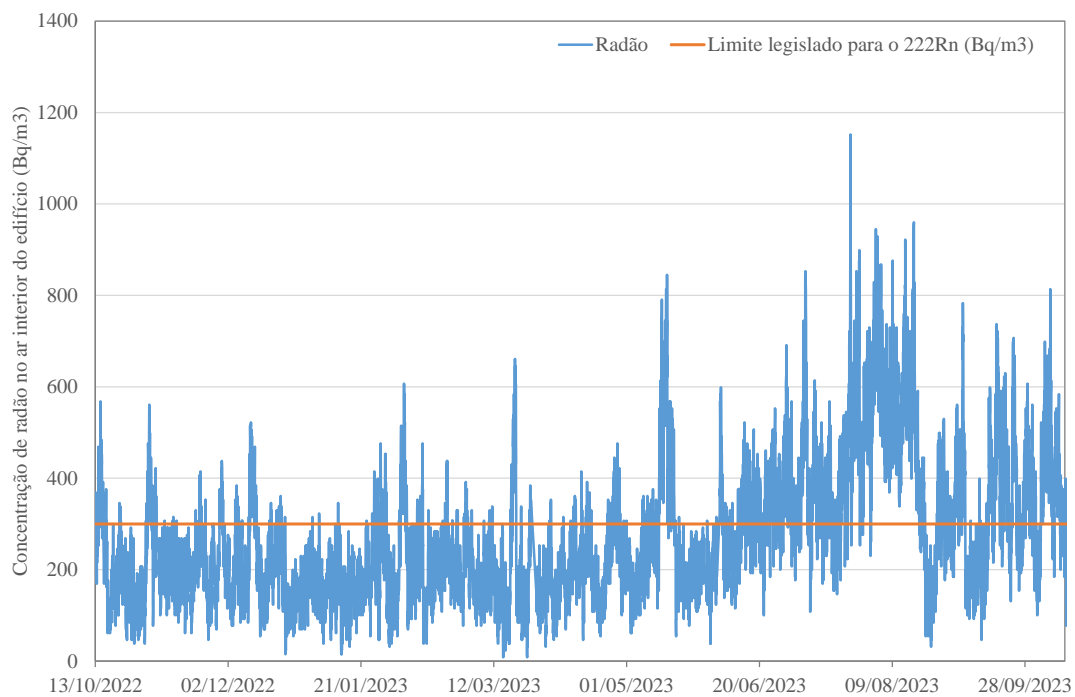


Figura 3.18 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício amostrado para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023. A linha laranja representa o nível de referência previsto na legislação nacional.

Apesar do valor máximo de concentração de radão no ar interior do edifício em estudo ultrapassar de modo significativo o limite estipulado, este não representa o valor máximo já registado no ar interior de um edifício em Ponta Delgada. Trabalhos realizados por Silva *et al.* (2014a, 2016) registaram valores máximos de 2460 Bq/m³ e 6806 Bq/m³, respetivamente, de concentração de radão no ar interior.

Como mencionado anteriormente o ponto de amostragem está localizado em um compartimento na cave do edifício selecionado, caracterizado por ser de fácil acesso e com presença humana esporádica. Assim, tendo em consideração esta informação e os valores médios calculados dos dois períodos definidos, não se considera este local como um ponto crítico do ponto de vista da saúde pública dos utilizadores do espaço, embora a permanência a longo prazo neste local não seja recomendada, dado que os valores ao longo do ano se encontram muita das vezes acima do limite legislado.

3.4.4 Considerações Gerais

O ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior permitiu identificar quais as variáveis independentes que influenciam as variações dos dados log-transformados da concentração de radão. As variáveis identificadas são a humidade relativa, a temperatura e a pressão barométrica no ar interior. Na análise espectral estas mesmas variáveis, mas no ar exterior, foram também identificadas, sendo ainda identificada a velocidade do vento como as variáveis com correlação associadas a variações cíclicas de um e dois ciclos por dia.

A humidade relativa no ar interior apresenta uma correlação positiva com as variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior no ponto de amostragem. Um comportamento semelhante foi observado por Spasić & Gulan (2022) em uma habitação localizada em uma zona com potencial para exalação de radão no solo. Esta relação pode ter origem no facto de níveis de humidade elevados no ar dificultarem a exalação do radão do solo para a atmosfera potenciando assim o aumento da concentração de radão nos níveis mais superficiais do solo (García-Talavera *et al.*, 2001) e promovendo, assim, a entrada deste gás no interior dos edifícios.

A temperatura no ar interior exerce uma influência positiva nos valores da concentração de radão registados no ponto de amostragem. Um comportamento semelhante foi descrito em outros trabalhos (Hubbard *et al.*, 1992, Spasić & Gulan, 2022). Hubbard *et al.* (1992) associou a variação sazonal observada, isto é, valores de concentração de radão mais elevados no verão do que nos meses de inverno, ao efeito da temperatura externa, em que aumentos da temperatura potenciavam aumentos da concentração de radão no ar interior dos edifícios estudados.

Associada a essa variação, considerou também o efeito da ventilação que era dominante naqueles edifícios durante o período de inverno.

A pressão barométrica no ar interior influencia positivamente a concentração de radão no ar interior do ponto de amostragem. Um efeito semelhante foi descrito para alguns dos edifícios monitorizados por Xie et al. (2015) e Ray et al. (2023). O seu efeito pode estar relacionado com o descrito por Groves-Kirkby *et al.* (2006), que considera que a pressão barométrica no exterior é mais elevada que a pressão no interior, forçando, assim, a entrada de radão no edifício. Na figura 3.19 é possível observar que a pressão barométrica no exterior do edifício amostrado é de uma forma geral mais elevada do que a pressão no interior do mesmo, com algumas exceções para os meses de inverno o que poderá também justificar os valores de concentração de radão mais baixos registados nesse período.



Figura 3.19 – Variação temporal da pressão barométrica no interior e no exterior do edifício amostrado para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

A velocidade do vento tem uma influência negativa sobre a concentração de radão no ar interior do edifício amostrado, podendo o seu efeito surgir, ou do aumento da eficiência da ventilação neste espaço, tal como descrito por vários autores (Riley *et al.*, 1996; Hubbard *et al.*, 1992; Xie *et al.*, 2015; Aquilina & Fenech, 2019) ou da remoção de radão que está a ser libertado do solo para a cave (Riley *et al.*, 1996).

Os valores de concentração de radão existentes no ar interior do edifício amostrado permitiram realçar a importância deste tipo de monitorização em regiões vulcânicas quiescentes,

pois sendo a desgaseificação difusa um processo contínuo, a população presente nestas regiões está em permanente risco de exposição aos gases libertados. Por outro lado, a concentração de radão no ar interior dos edifícios pode variar significativamente, dependendo de variações dos parâmetros meteorológicos, do tipo de construção e da ventilação existente.

4 Cartografia da Concentração de Radão no Ar Interior de Edifícios

4.1 Nota Prévia

A distribuição espacial da concentração de radão no ar interior de edifícios varia devido às características geológicas do local, como a presença de falhas, a existência de radão nas unidades litológicas e/ou no solo sobre os quais os imóveis se encontram construídos, as características do próprio edifício, como o tipo de material utilizado, o tipo de construção e a ventilação, esta última que depende em grande parte também dos hábitos dos ocupantes do espaço.

Neste capítulo procura-se analisar a qualidade do ar interior, relativamente ao radão, do edificado da cidade de Ponta Delgada, mais precisamente das freguesias de Santa Clara, São José, São Sebastião e São Pedro, assim como analisar a sua distribuição espacial. Foram efetuadas duas campanhas, uma durante os meses de verão e a outra no inverno, com a intenção de se identificar possíveis variações sazonais da concentração deste gás.

4.2 Metodologia de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados

4.2.1 Equipamento

Para efetuar a monitorização da concentração de radão no ar interior de diversos edifícios localizados na cidade de Ponta Delgada foram utilizados detetores de radão *Ramon 2.2 – Radon Monitor* da *GT-Analytic KEG* (Foto 4.1). Este equipamento possui dois modos de medição possíveis: um para períodos curtos e outro para períodos de amostragem mais longos. O primeiro corresponde ao modo S, e permite realizar a amostragem em períodos de até sete dias. O segundo modo, designado de L, possibilita a realização de amostragens em períodos até cinco anos. Estes detetores realizam a amostragem por difusão e apresentam uma resolução de 1 Bq/m³ e uma precisão de $\pm 20\%$, possuindo um limite de deteção entre 1 e 9999 Bq/m³ (GT-Analytic KEG, 2003).



Foto 4.1 - Detetor de radão utilizado na monitorização da qualidade do ar interior de edifícios.

Este equipamento consegue detetar partículas α , correspondendo a um detetor de silício (material semi-condutor). As medições são efetuadas em intervalos de uma hora, obtendo-se o valor no visor equivalente à média da concentração de radão no ar interior em conformidade com o modo de medição escolhido. O primeiro valor surge 24 horas após o início da medição, sendo atualizado, após este período, com uma frequência horária (GT-Analytic KEG, 2003).

Foi ainda utilizado um dispositivo GPS portátil, *GPSMAP 86S* da *Garmin* (Foto 4.2) pré-carregado com um mapa de base mundial, permitindo executar diversas funções, entre elas, a observação e recolha de coordenadas M e P (UTM) que foram registados para cada ponto de amostragem (Garmin, 2019).



Foto 4.2 - GPS portátil utilizado para registo de coordenadas.

4.2.2 Amostragem

A amostragem da concentração de radão no ar interior foi realizada em 28 edifícios da cidade de Ponta Delgada, tendo incluído duas campanhas de amostragem: uma realizada no período de verão e outra no inverno de forma a contemplar eventuais variações sazonais. No entanto, na campanha de inverno, apenas foi possível repetir a monitorização em 26 dos 28 edifícios, devido quer à mudança de proprietário, quer ao encerramento de um estabelecimento público, o que impossibilitou o acesso aos mesmos.

A campanha realizada no verão decorreu no período compreendido entre 3 e 30 de agosto de 2022 e a realizada no inverno foi efetuada entre 11 de janeiro e 8 de fevereiro de 2023. Em cada campanha, a medição foi efetuada em modo L, em um único período de catorze dias. As medições foram efetuadas ao nível do chão, de modo a uniformizar as medições efetuadas nos diferentes edifícios, tendo os detetores sido instalados no piso diretamente em contacto com o solo, ou seja, no rés-do-chão, ou em caves quando de possível acesso. Para cada edifício foi efetuado um levantamento das características do mesmo, contendo parâmetros como a presença de cave ou caixa de ar, o material de construção, o revestimento das paredes e do chão, o estado de conservação e a ventilação do espaço (Anexo III). A ficha de levantamento das características dos edifícios aplicada neste trabalho foi elaborada por Silva (2013) tendo sido aplicada anteriormente em outros trabalhos (Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014b). No processo de seleção dos pontos a amostrar foi tida em conta uma distribuição que permitisse abranger toda a área urbana da cidade de Ponta Delgada.

4.2.3 Recolha e Análise dos Dados

Os dados de concentração de radão no ar interior, foram adquiridos durante um período de amostragem de 14 dias em cada campanha de amostragem, tendo sido registado o valor médio no final deste período. Utilizando um ficheiro Excel foram registadas, para além dos valores médios da concentração de radão no ar interior, as respetivas coordenadas dos pontos amostrados (M e P). Os dados obtidos foram posteriormente projetados sobre um mapa de freguesias base da região, utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG), neste caso, com recurso ao software *QGIS* versão 3.22.3, *Białowieża*. Na figura 4.1 é possível observar a localização dos pontos amostrados.

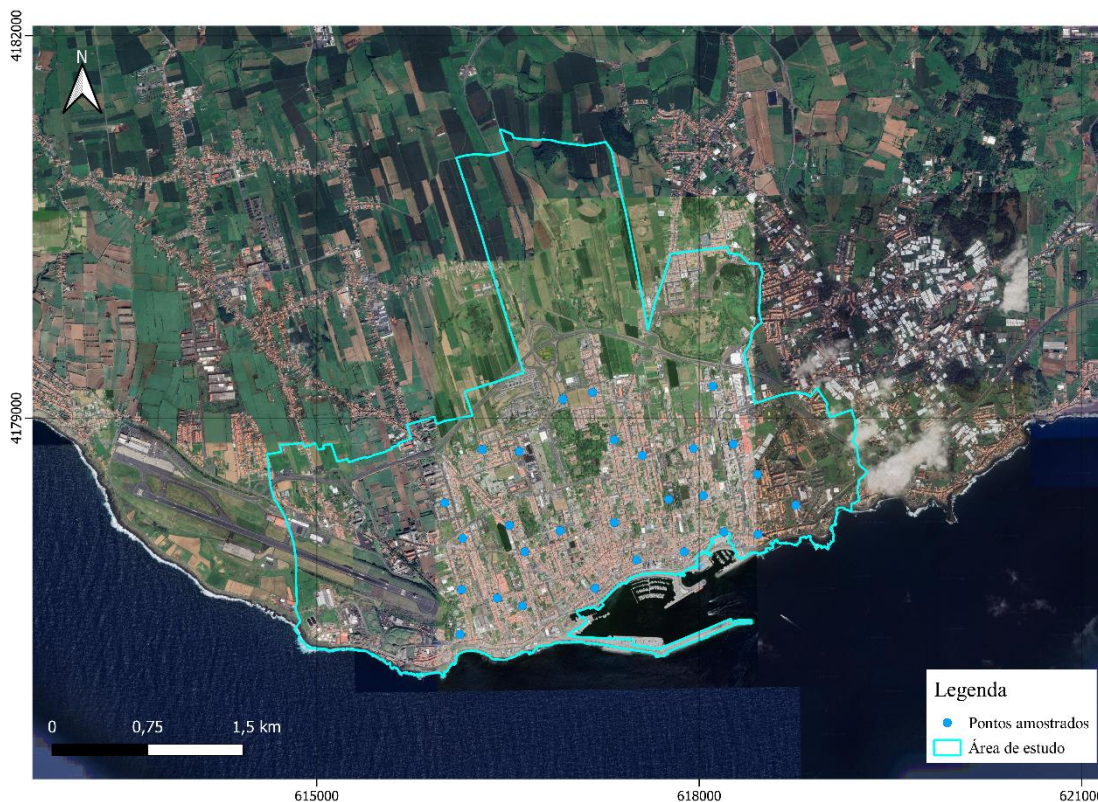


Figura 4.1 - Localização dos pontos amostrados (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

4.3 Apresentação de Resultados

O levantamento das características dos edifícios amostrados permitiu verificar que a maioria corresponde a estabelecimentos públicos ou de comércio (92,3%) e os restantes, a habitações próprias (7,7%). No geral, 69,2% dos edifícios foram construídos na sua totalidade por blocos de betão furado e cimento, sendo os restantes 30,8% de rocha. Relativamente ao material usado nas paredes, em 76,9% dos casos foram usados cimento e blocos de betão furado, sendo nos restantes casos usada rocha (15,4%), ou cimento e rocha (7,7%). Todas as paredes nos locais de amostragem estavam revestidas por tinta.

A maioria dos edifícios foi construído, ou reconstruído, nos últimos 25 anos (65,4%), assim sendo, muitos destes edifícios encontravam-se em muito bom (46,2%) e em médio (30,8%) estado de conservação. O número de pisos por edifício variou entre 0 e 5 pisos, sendo um edificado apenas com rés-do-chão. Em nenhum dos edifícios havia caixa-de-ar e em 34,6% havia cave.

As amostragens, com exceção de dois locais, foram todas realizadas em compartimentos do rés-do-chão. Nos compartimentos amostrados, o chão encontrava-se revestido metade em ladrilho e a outra metade em outro tipo de materiais como cimento (11,5%), madeira (26,9%) e

outros (11,5%), sendo estes outros alcatifas e linóleo. Os locais de amostragem corresponderam a diversos compartimentos como, por exemplo, escritórios, arrecadações, armazéns, etc. Foram observadas fendas no chão em 61,5% das divisões amostradas e cerca de 50,0% apresentavam ventilação para o exterior, essencialmente através de portas (42,3%), e janelas (7,7%).

Os valores da concentração do radão no ar interior destes edifícios, variaram entre os 11 Bq/m³ e os 1710 Bq/m³, apresentando uma média de 309 Bq/m³, na campanha de verão. Na campanha de inverno, os valores variaram entre 20 Bq/m³ e 308 Bq/m³, apresentando uma média de 128 Bq/m³. Na figura 4.2, é apresentada a concentração do radão em cada edifício amostrado nas duas campanhas realizadas. Na tabela 4.1, está sintetizada a estatística descritiva dos dados obtidos nas duas campanhas realizadas.

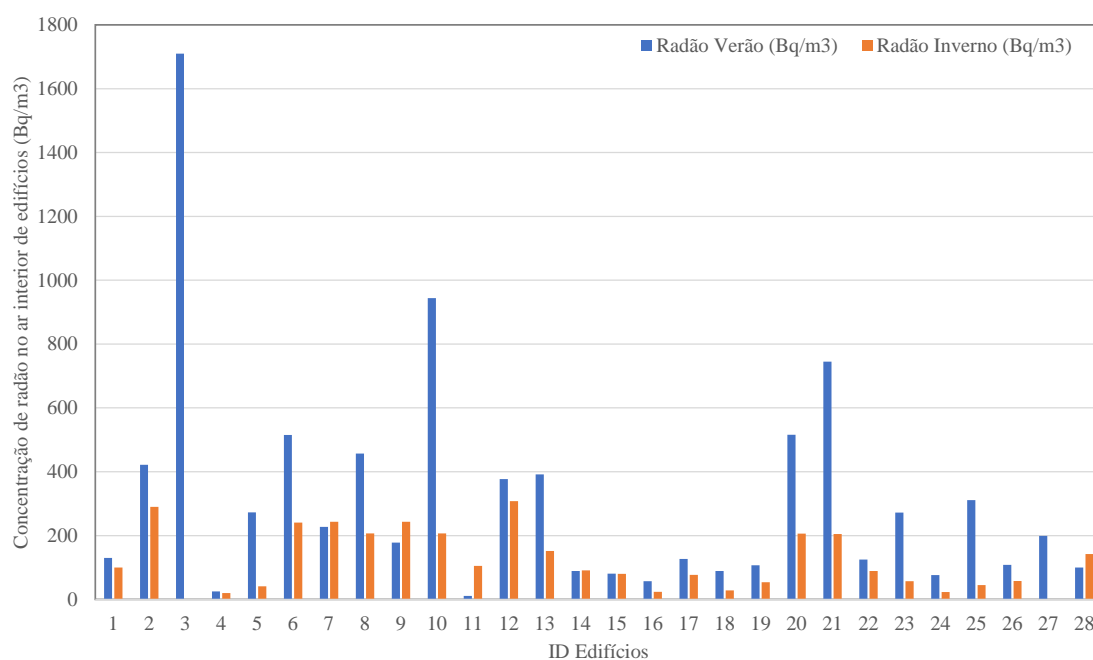


Figura 4.2 - Concentração de radão no ar interior de edifícios, nas campanhas realizadas no verão e no inverno, na área de estudo.

Tabela 4.1 - Estatística descritiva dos dados de concentração de radão no ar interior de edifícios da área de estudo nas duas campanhas realizadas.

Área de estudo	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
Campanha de Verão	309	354	189	11	1710	28
Campanha de Inverno	128	91	96	20	308	26

4.4 Discussão

A monitorização da concentração de radão no ar interior dos edifícios localizados na cidade de Ponta Delgada, permitiu identificar variações sazonais na concentração deste gás no ar interior dos edifícios amostrados. Os valores obtidos são, de um modo geral, superiores nos meses de verão quando comparados com os obtidos nos meses de inverno, apresentando uma média de 309 Bq/m^3 para os meses de verão, (oscilando entre 11 Bq/m^3 e 1710 Bq/m^3) e de 128 Bq/m^3 para os meses de inverno (oscilando entre 20 Bq/m^3 e 308 Bq/m^3) (Tabela 4.1). Na cave de um dos edifícios, o valor máximo registado no presente trabalho (1710 Bq/m^3), é mais elevado do que os obtidos em trabalhos de monitorização regular anteriormente realizados em um edifício localizado na cidade de Ponta Delgada, no qual foram registados valores máximos de 1082 Bq/m^3 (Silva *et al.*, 2014a). Esse valor máximo, quando comparado com resultados obtidos em sistemas traquíticos, como o Vulcão das Furnas, é superior ao valor máximo obtido em edifícios localizados no flanco deste vulcão, na freguesia da Ribeira Quente (809 Bq/m^3) sendo, no entanto, bastante inferior aos valores máximos medidos em edifícios localizados no interior da caldeira, na freguesia das Furnas (7406 Bq/m^3) (Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014b). Salienta-se, no entanto, que a sazonalidade observada nos dados das duas freguesias localizadas no Vulcão das Furnas apresenta valores mais elevados no inverno quando comparados com os dados registados na campanha realizada no verão.

Tendo em consideração o valor limite de 100 Bq/m^3 recomendado pela OMS (WHO, 2009) e os 300 Bq/m^3 previstos na legislação nacional (D.L. n°108/2018, Artº. 154) foi efetuada uma análise aos dados obtidos em cada campanha realizada de forma a melhor compreender essa variação sazonal e as possíveis implicações em termos de saúde. Na campanha realizada no verão, cerca de 75% e 36% dos edifícios amostrados exibem uma concentração de radão superior ao limite recomendado pela OMS e previsto na legislação nacional, respetivamente, ao passo que, estas percentagens diminuem para 50% e 4% na campanha realizada no inverno (Figura 4.3).

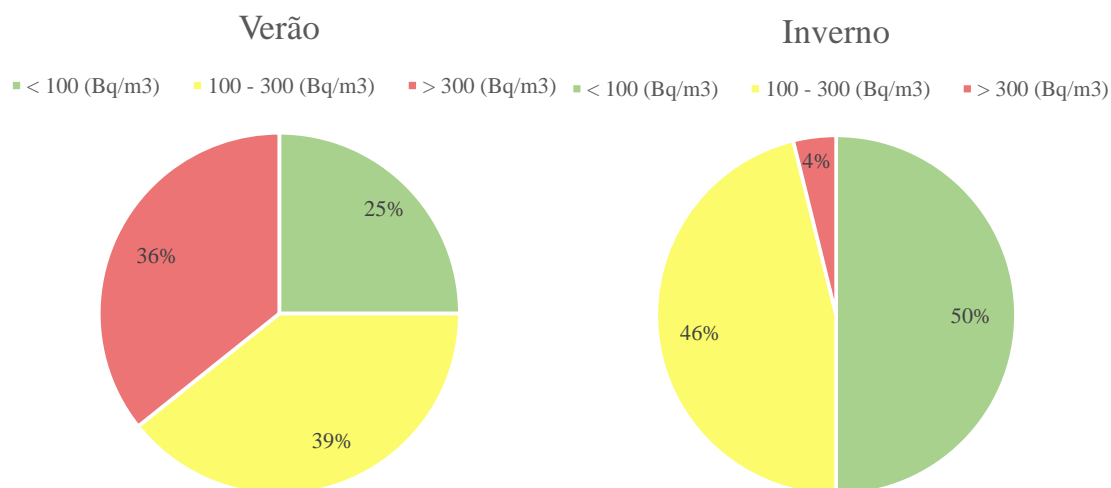


Figura 4.3 - Concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e pela legislação nacional nas campanhas de verão (esquerda) e inverno (direita).

Os dados obtidos revelam que as concentrações de radão na campanha realizada no verão são, de um modo geral, superiores às observadas na campanha realizada no inverno, ao contrário do que é documentado em diversos estudos realizados em diferentes locais (Papaefthymiou *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2014b; Yousef & Zimami, 2019; Belete & Shiferaw, 2022), onde se observam concentrações de radão mais elevadas na época de inverno quando comparadas com as registadas no verão. Estes resultados estão, no entanto, de acordo com os resultados obtidos no ensaio de monitorização contínua (Capítulo 3). Neste ensaio, e à semelhança dos resultados obtidos na cartografia da concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados, observam-se valores mais elevados de radão durante os meses de verão em comparação com os meses de inverno. Uma situação semelhante, foi reportada por Hubbard *et al.* (1992) tendo associado essa variação, por um lado, ao efeito da temperatura externa, em que aumentos da temperatura potenciavam aumentos da concentração de radão no ar interior dos edifícios estudados e, por outro, ao efeito da ventilação que era dominante naqueles edifícios durante o período de inverno (Hubbard *et al.*, 1992).

O local de instalação do equipamento de monitorização contínua coincide com um dos pontos amostrados na cartografia. Assim, à semelhança da variação sazonal total, nos períodos em que houve registo dos dois equipamentos em simultâneo, observou-se um comportamento similar dos valores registados apresentando valores de concentração de radão mais elevados no verão e mais baixos no inverno. Para o mesmo período de amostragem, no inverno, na amostragem em contínuo registaram-se valores médios de 165 Bq/m³ e de 207 Bq/m³ na monitorização regular, enquanto no verão registaram-se 862 Bq/m³ e 944 Bq/m³ na amostragem em contínuo e na monitorização regular, respetivamente.

Considerando a variação sazonal existente na concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados e que quer o valor recomendado pela OMS, quer o previsto na legislação nacional se referem a médias anuais, foi calculada a média anual da concentração deste gás (C) para cada edifício, de acordo com a equação 4.1 (Bossew & Lettner, 2007).

$$(4.1) \quad C = Q \times C_{\text{verão}} + (1 - Q) \times C_{\text{inverno}}$$

Em que:

Q = fração do ano correspondente aos meses de verão;

$C_{\text{verão}}$ = concentração de radão no ar interior do edifício na amostragem de verão (Bq/m^3);

C_{inverno} = concentração de radão no ar interior do edifício na amostragem de inverno (Bq/m^3).

Neste trabalho foram utilizadas as frações do ano correspondentes aos meses de verão e de inverno definidas em trabalhos anteriores para os 26 edifícios amostrados (Silva, 2013 e Silva *et al.*, 2014b). Tendo por base os resultados obtidos na monitorização de radão no solo em estudos realizados no Vulcão das Furnas e a variação sazonal observada pela aplicação da análise espectral, Silva (2013) e Silva *et al.* (2014b) dividiram o ano em 2 períodos de 6 meses, um correspondente ao verão e o outro ao inverno. O período de verão corresponde ao período compreendido entre os meses de maio a outubro, enquanto o período de inverno corresponde ao período compreendido entre os meses de novembro a abril. Os cálculos das médias anuais efetuadas para cada edifício, variaram entre 23 Bq/m^3 e 576 Bq/m^3 , resultando em um valor médio de 194 Bq/m^3 . Cerca de 65% (17 dos 26 pontos amostrados) dos edifícios amostrados apresentam médias anuais superiores ao limite de 100 Bq/m^3 definido pela OMS e 27% (7 dos 26 pontos amostrados) apresentam médias acima do limite estipulado pela legislação nacional (Figura 4.6).

Média Anual

■ < 100 (Bq/m³) ■ 100 - 300 (Bq/m³) ■ > 300 (Bq/m³)

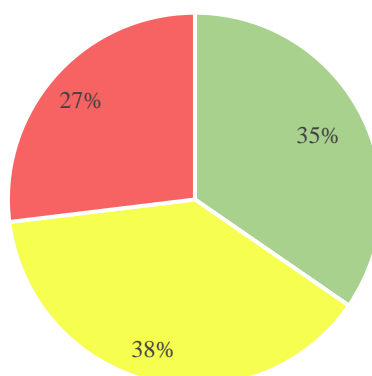


Figura 4.4 - Média anual da concentração de radão no ar interior dos edifícios.

Comparando uma vez mais, os valores máximos das médias anuais obtidas neste trabalho (576 Bq/m³) com as médias anuais máximas obtidas em trabalhos anteriores, nomeadamente, por Silva (2013) e Silva *et al.* (2014b) no ar interior de edifícios localizados no Vulcão das Furnas, verifica-se que, à semelhança do reportado para os valores máximos registados, também neste caso, o valor médio anual máximo é superior nos edifícios localizados em Ponta Delgada quando comparado com o registado na freguesia da Ribeira Quente (474 Bq/m³), mas é bastante inferior quando comparado com o valor médio anual máximo registado em edifícios localizados na freguesia das Furnas (6403 Bq/m³).

No que se refere à distribuição espacial da concentração de radão no ar interior e analisando os mapas da distribuição espacial dos pontos amostrados nas duas campanhas realizadas (Figuras 4.5 e 4.6), observa-se que na maior parte da cidade de Ponta Delgada foram medidas concentrações de radão acima dos valores recomendados pela OMS ou dos previstos pela legislação portuguesa. Na campanha de verão nota-se que, na zona oeste (Figura 4.5, zona A) e centro-este (Figura 4.5, zona B) da cidade, existe uma concentração de pontos com valores mais elevados, apresentando valores entre 100-300 Bq/m³ e mesmo superiores a 300 Bq/m³. Na campanha de inverno, e nas duas zonas anteriormente referidas (A e B), é perceptível a existência de pontos com valores elevados, mas com menor expressão do que o observado na campanha de verão, ou seja, com uma maior distribuição de valores entre os 100-300 Bq/m³.

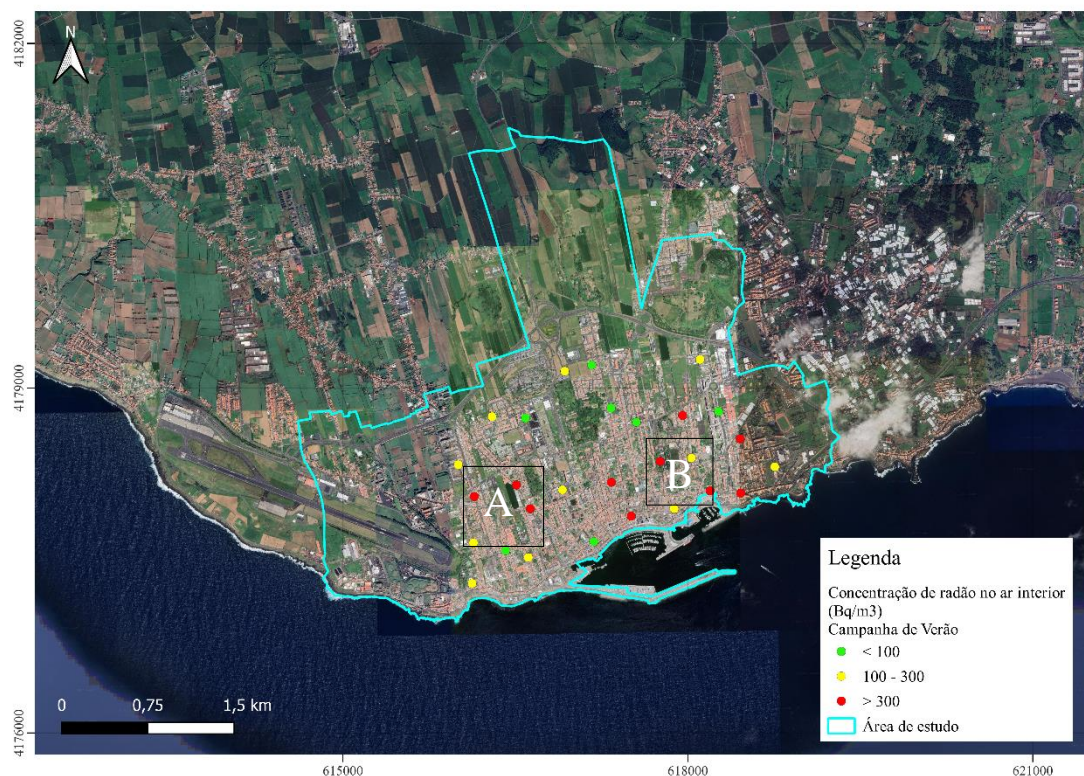


Figura 4.5 - Distribuição dos pontos amostrados com a concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional para a campanha de verão. A – Zona oeste; B – Zona centro-este (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

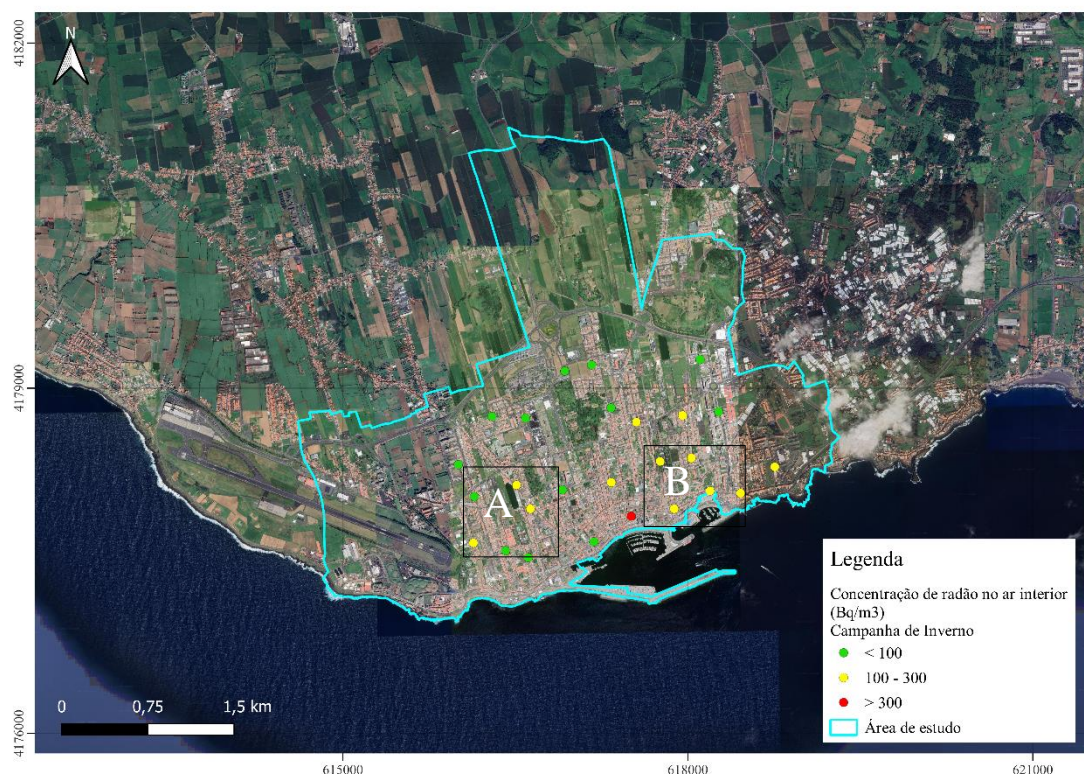


Figura 4.6 - Distribuição dos pontos amostrados com a concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional para a campanha de inverno. A – Zona oeste; B – Zona centro-este (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

Examinando a distribuição dos pontos referentes às médias anuais de concentração de radão, confirma-se a presença de valores acima do recomendado pela legislação nacional quer na zona oeste (A), quer na zona centro-este (B) da cidade.

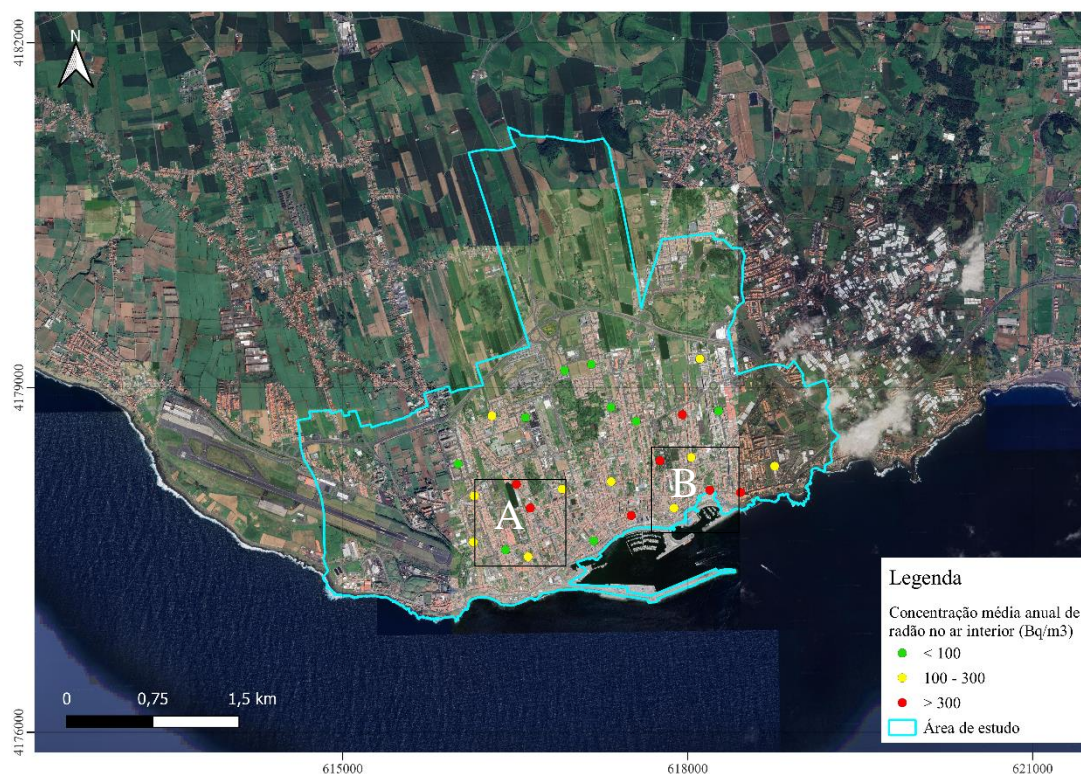


Figura 4.7 - Distribuição dos pontos amostrados com a média anual da concentração de radão no ar interior dos edifícios tendo em conta os limites recomendados pela OMS e previsto na legislação nacional. A – Zona oeste; B – Zona centro-este (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

Tal como referido no capítulo 1, o radão que se acumula no ar interior de edifícios pode ser proveniente de três fontes distintas: o solo, o material de construção e a água que abastece o edifício.

No que se refere ao material de construção, a constituição da maior parte dos edifícios amostrados é composta essencialmente por blocos de betão furado e cimento, e com menor expressão por rocha basáltica local. Segundo Leite (2008) a alvenaria utilizada para construção no arquipélago dos Açores é maioritariamente constituída por blocos de betão de fabrico local, compostos por água, cimento, escórias vulcânicas - *lapilli* (vulgarmente designado por bagacina) e tufo, sendo que, devido às suas propriedades, a incorporação de escórias no betão, torna-o um betão leve. Então, tendo por base a tabela 1.4, observa-se que a concentração de rádio (^{226}Ra) típica emitida por estes materiais de construção é de 60 Bq/kg no que diz respeito ao betão leve e à rocha basáltica. Tendo em consideração que o basalto é uma rocha muito utilizada na construção do edificado açoriano, este material poderá contribuir também com

alguma percentagem de concentração de radão para o ar interior, como descrito nas tabelas 1.2 e 1.3. Assim, apesar destes materiais poderem contribuir para a concentração de radão no ar interior dos edifícios, e tendo em consideração que o material de construção utilizado nos edifícios amostrados é bastante uniforme, a sua contribuição deverá ser também ela bastante uniforme pelo que as diferenças da concentração de radão no ar interior observadas não deverão ser resultado dos materiais de construção utilizados.

Relativamente ao fornecimento de água a estes edifícios, esta é proveniente da rede de abastecimento público. O abastecimento de água em Ponta Delgada é efetuado através do recurso a massas de água subterrâneas (nascentes e poços). As nascentes estão associadas a massas de água subterrâneas localizadas nos vulcões centrais adjacentes (Sete Cidade e Fogo) enquanto os poços localizam-se no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Cordeiro *et al.*, 2012; Valente *et al.*, 2022). No sistema de abastecimento de água de Ponta Delgada (Figura 4.8) existem ainda vários reservatórios onde a água fica armazenada e estações de tratamento de água (Cordeiro *et al.*, 2012; Valente *et al.*, 2022).

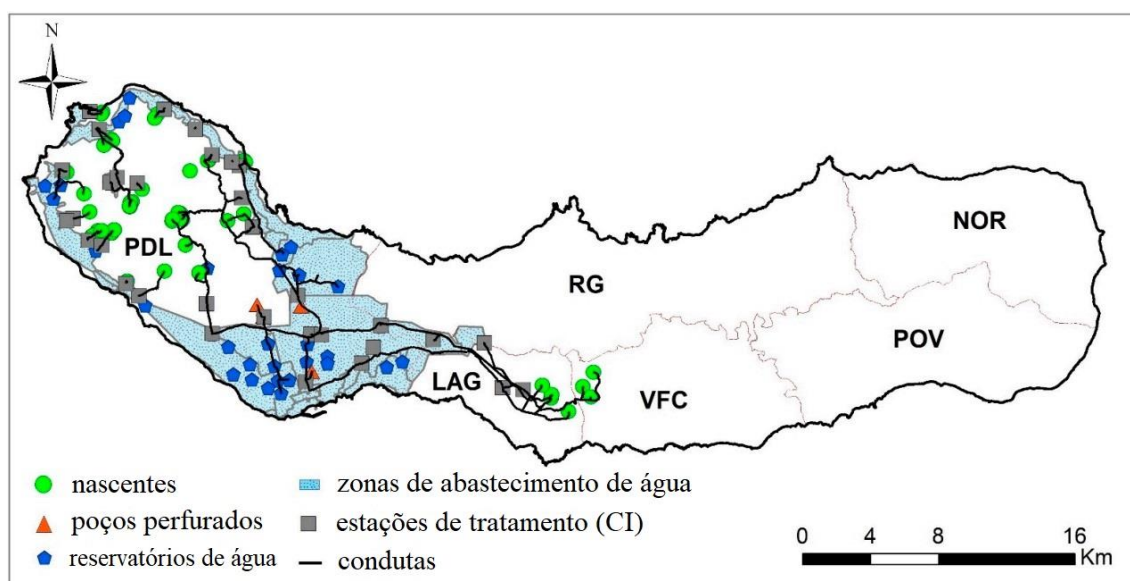


Figura 4.8 – Sistema de abastecimento de água de Ponta Delgada (SMAS) e municípios. PDL – Ponta Delgada; LAG – Lagoa; VFC – Vila Franca do Campo; POV – Povoação; NOR – Nordeste (modificado de Valente *et al.*, 2022).

Branco *et al.* (2021) realizaram um estudo sobre a ocorrência de radão em massas de água subterrâneas na ilha de São Miguel no qual foram amostradas 42 nascentes. Nas nascentes amostradas, o teor de radão detetado variou entre 0,99 e 559,67 Bq/L (Figura 4.9), sendo que todas as nascentes utilizadas para consumo humano cumprem o valor limite previsto pela lei nacional (500 Bq/L; D.L. n.º23/2016, Anexo I) e estão longe do valor que segundo a mesma normativa exige quaisquer medidas de remediação (1×10^3 Bq/L).

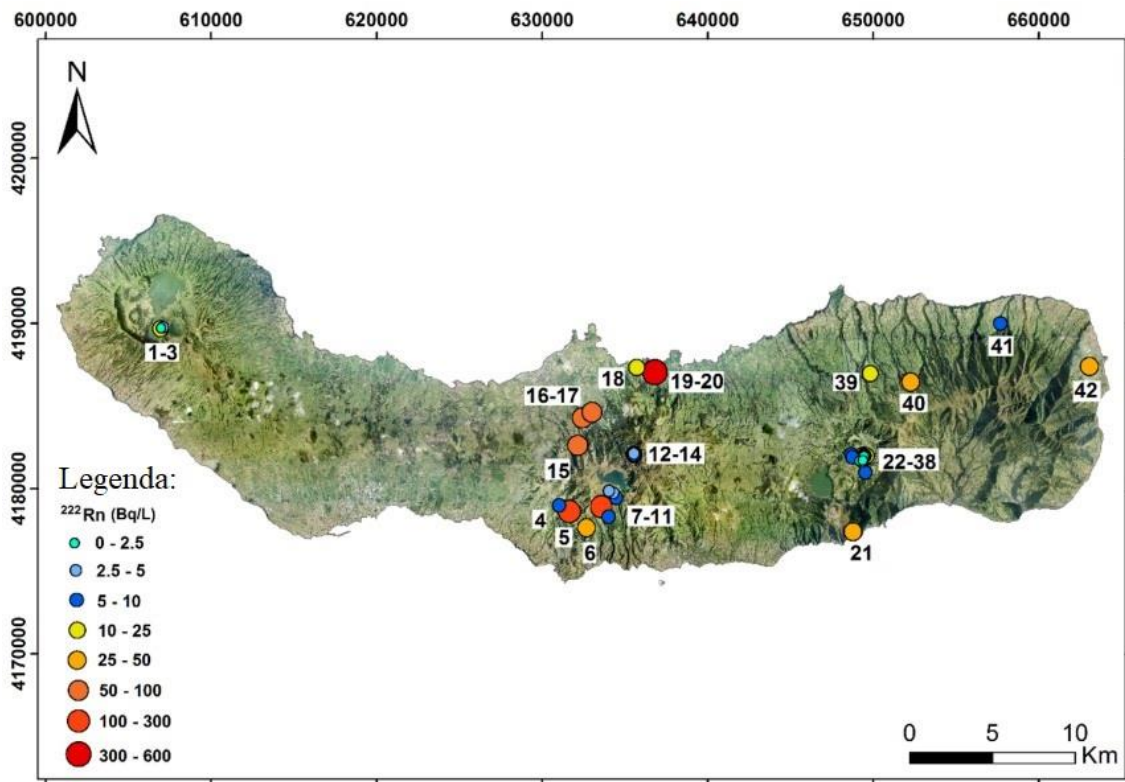


Figura 4.9 – Distribuição geográfica do teor de ^{222}Rn em nascentes na ilha de São Miguel, campanha realizada no verão (modificado de Branco et al., 2021).

Apesar de não terem sido amostradas todas as nascentes que fornecem água à cidade de Ponta Delgada no trabalho de Branco *et al.* (2021), e na eventualidade de que em alguma nascente ou poço o limite legislado seja ultrapassado, o facto da mesma passar por toda uma rede de tubagens, reservatórios e estações de tratamento de água, associado ao curto tempo de semi-vida do radão, faz com que a sua contribuição para o radão medido no ar interior dos edifícios amostrados seja mínima. Assim, as diferenças de concentrações de radão encontradas não deverão ser provenientes da água que abastece os edifícios amostrados.

Do ponto de vista geológico, a composição das rochas e dos solos onde se encontram os pontos amostrados são semelhantes para toda a área de estudo (Figura 4.10). Assim, a litologia por si só não será o fator que justifique a variação de radão que ocorre na área de estudo. No entanto, a exalação de determinado gás à superfície terrestre não ocorre de modo uniforme num sistema vulcânico, estando a sua ascensão à superfície dependente da existência de zonas com maior permeabilidade (Silva, 2013). Apesar de não existirem falhas cartografadas na área de estudo, esta zona localiza-se no prolongamento de algumas das estruturas identificadas por Carmo *et al.* (2015), e que eventualmente se poderão estender até à cidade de Ponta Delgada (Figura 4.11). De facto, trabalhos anteriormente realizados na cidade de Ponta Delgada, onde foram medidos valores máximos de concentração de radão no solo de 24300 Bq/m^3 (Silva *et al.*,

2014a) apontam para o solo como a principal fonte de entrada de radão nos edifícios amostrados.

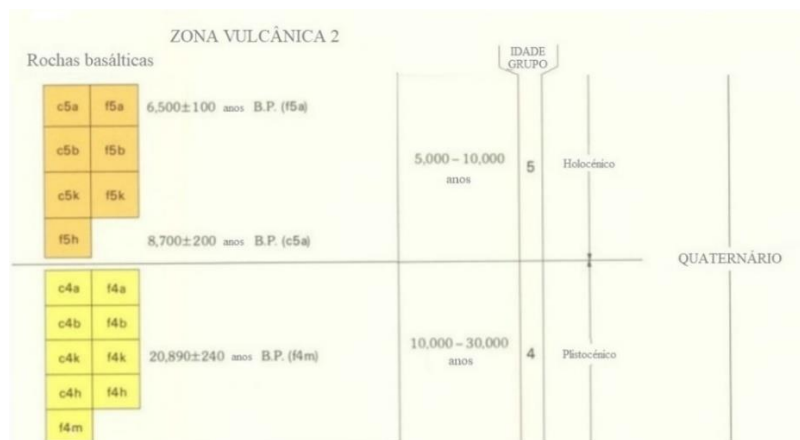
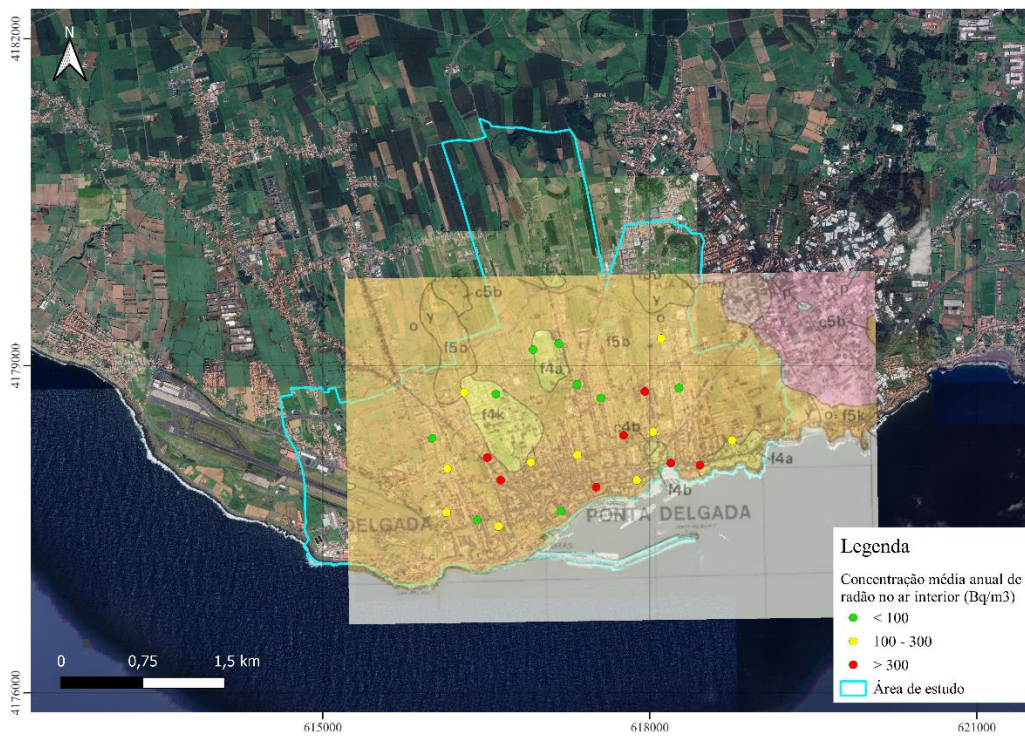


Figura 4.10 – Sobreposição de um excerto da cartografia de depósitos de antigas erupções que afetaram a área onde se localiza a cidade de Ponta Delgada e a sua respetiva legenda (Moore, 1991) com a distribuição dos pontos amostrados com a média anual de concentração de radão no ar interior dos edifícios, tendo em conta o limite recomendado pela OMS e previsto na legislação nacional (coordenadas UTM, da zona 26S, Datum WGS84).

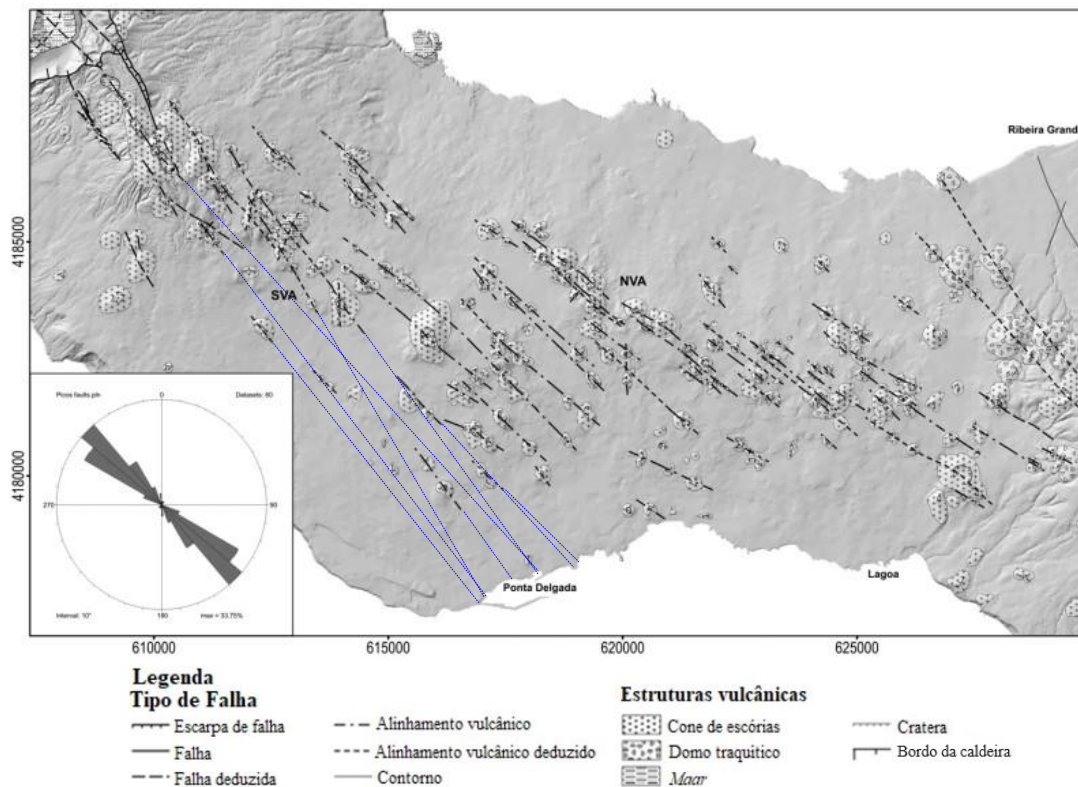


Figura 4.11 - Principais estruturas vulcanotectónicas do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Carmo, 2013) e histograma circular de frequências não ponderadas das direções do plano de falha (TectonicsFP software; Ortner et al., 2002). SVA - Alinhamento Vulcânico Sul; NVA - Alinhamento Vulcânico Norte. A azul estão assinalados os possíveis prolongamentos das estruturas já cartografadas até à cidade de Ponta Delgada (adaptado de: Carmo et al., 2015).

Um outro fator que condiciona fortemente a concentração de radão no ar interior de um edifício é a ventilação. Dos edifícios amostrados a maioria corresponde a estabelecimentos públicos ou de comércio (92,3%). Nos espaços dos edifícios onde foram colocados os equipamentos, metade dos edifícios amostrados apresenta pontos de ventilação (portas e janelas) com ligação ao exterior. Dos locais amostrados que tinham ligação com o exterior, durante a campanha de verão, 69,2% foram mantidos abertos, 30,8% estiveram temporariamente abertos e nenhum deles se manteve fechado. Na campanha de inverno, nos locais amostrados com ligação para o exterior, 46,2% foram mantidos abertas, 38,5% estiveram temporariamente abertos e 15,4% foram raramente abertas ou mantidas fechadas. Apesar da maior percentagem de compartimentos que estiveram abertos ou temporariamente abertos durante a campanha de verão (100%), uma importante percentagem manteve estas condições na campanha de inverno (84,7%), podendo justificar a sazonalidade observada devido a uma ventilação mais eficaz destes espaços durante o inverno.

Por outro lado, e uma vez que a grande maioria dos edifícios amostrados (92,3%) correspondem a estabelecimentos públicos ou de comércio, isto significa que a porta de entrada

foi mantida aberta quer na campanha de verão, quer na de inverno, pelo menos durante o horário de funcionamento. Em alguns casos, essa porta foi mesmo sempre mantida aberta. Assim, nestes edifícios as condições de ventilação foram semelhantes aquando da realização das duas campanhas, o que poderá ter contribuído para os valores mais elevados observados no verão, uma vez que no inverno, devido à ação do vento, deverá ter ocorrido uma ventilação mais eficaz destes espaços. Mesmo que as portas dos compartimentos amostrados estivessem fechadas, estes espaços foram muito provavelmente influenciados pela ventilação do edifício, sobretudo em dias com velocidade do vento elevada. As condições de ventilação observadas, estão de acordo com o descrito, por exemplo, por Silva *et al.* (2014a), que através de ensaios de monitorização da concentração de radão no ar interior e com a realização de testes de ventilação, permitiu verificar que, de um modo geral, a simples abertura das janelas é suficiente para que os valores de concentração de radão no espaço de amostragem diminuam para valores admissíveis. Por conseguinte, a ventilação desempenha um papel importante no que diz respeito à diminuição da concentração de radão que se acumula no ar interior dos edifícios.

A realização da cartografia das médias anuais da concentração de radão calculadas permitiu identificar duas zonas na cidade de Ponta Delgada com valores superiores aos 300 Bq/m³ previstos na legislação portuguesa. Como mencionado no capítulo 1, por cada incremento de 100 Bq/m³ da concentração de radão no ar interior, a probabilidade de um indivíduo exposto contrair cancro no pulmão aumenta 16% (Darby *et al.*, 2004; Krewski *et al.*, 2005; WHO, 2009). Assim, indivíduos que permaneçam por períodos prolongados (anos) em edifícios com concentrações de radão acima de 100 Bq/m³, 200 Bq/m³ e 300 Bq/m³ apresentam, respetivamente, cerca de 16%, 32% e 48% de probabilidade de adquirir esta doença, podendo estas probabilidades serem ainda superiores no caso de indivíduos que sejam fumadores (Jones, 1999; Williams-Jones & Reymer, 2000). Estas probabilidades devem ser tidas em conta no que se refere à prevenção e mitigação da exposição a esse gás, devendo ser respeitado o valor limite definido na legislação nacional, sendo aplicadas medidas de mitigação sempre que necessário.

4.4.1 Considerações Gerais

Como mencionado anteriormente, o solo, a água, e os materiais de construção são as três principais fontes de entrada de radão no ar interior dos edifícios, contribuindo para a acumulação deste gás no ar interior. Os materiais utilizados na construção da maioria dos edifícios na cidade de Ponta Delgada são homogêneos, correspondendo a blocos de betão furado, cimento e rocha. O abastecimento de água também é comum sendo efetuado através da rede de abastecimento público. Portanto, assumindo que estas duas fontes de entrada de radão são constantes na contribuição de radão para todos os edifícios, as diferenças encontradas deverão resultar, essencialmente, da fonte de radão restante, o solo. Embora na carta geológica se observe uma composição bastante homogênea, é de referir que pequenas variações na composição da rocha e/ou minerais presentes podem condicionar a exalação de radão. Deste modo, seria importante a realização de uma cartografia geológica detalhada com o intuito de obter essas informações.

As campanhas de monitorização da concentração de radão no ar interior dos edifícios foram efetuadas no verão e no inverno de modo a tentar identificar possíveis variações sazonais da concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados. Deste modo, foi possível verificar que os valores obtidos para os meses de verão são superiores aos valores obtidos nos meses de inverno, contrariamente ao reportado pela maior parte dos estudos efetuados sobre o tema, onde observaram concentrações de radão no ar interior dos edifícios mais elevada nos meses de inverno. Os resultados obtidos, estão, no entanto, em concordância com o observado no ensaio de monitorização contínua realizado num edifício localizado na cidade de Ponta Delgada (Capítulo 3).

A cartografia da distribuição espacial dos valores médios anuais calculados permitiu verificar a existência de duas áreas com valores acima do legislado na cidade de Ponta Delgada. A zona oeste (A) apresenta valores acima do valor legislado apenas na cartografia realizada no verão, ao passo que na zona centro-este (B), os valores registados encontram-se acima desse valor quer na cartografia realizada no verão, quer na realizada no inverno. A percentagem de edifícios com valores médios anuais de concentração do radão no ar interior entre 100-300 Bq/m³ é de cerca de 38% (10 dos 26 pontos amostrados) e de aproximadamente 27% (7 dos 26 pontos amostrados) para valores superiores a 300 Bq/m³.

Os valores médios anuais de concentração de radão calculados no ar interior dos edifícios amostrados na cidade de Ponta Delgada, em alguns casos, excedem os limites previstos quer pela legislação nacional, quer os recomendados por organizações internacionais (OMS) e realçam a importância deste tipo de estudos em regiões vulcânicas quiescentes. Mesmo em zonas que pela sua litologia aparentam não ter uma elevada concentração de radão, como é o

caso de regiões basálticas, este gás pode acumular-se no interior dos edifícios em concentrações superiores às legisladas, dependendo de determinadas circunstâncias associadas a variações de parâmetros meteorológicos, aos hábitos dos ocupantes dos edifícios e à presença de estruturas geológicas (*e.g.* falhas ocultas).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O radão (^{222}Rn) é um gás radioativo, incolor e inodoro que se forma a partir da cadeia de decaimento do urânio, e que ocorre naturalmente. Como o ^{238}U está presente em solos e rochas por todo o planeta, a exposição ao radão é universal. Tendo em consideração o potencial cancerígeno do radão, a acumulação deste gás em elevadas concentrações no ar interior de edifícios pode conduzir a graves problemas de saúde para os seus ocupantes, onde, em casos extremos, pode levar ao desenvolvimento de doenças oncológicas tais como o cancro do pulmão. Trabalhos anteriores, realizados na cidade de Ponta Delgada (Silva *et al.*, 2014a, 2016), identificaram um edifício onde os valores de concentração de radão estavam acima do valor legislado. Assim, para melhor conhecer e compreender a situação em termos de radão no edificado da cidade de Ponta Delgada, vários edifícios foram selecionados para a realização de uma monitorização regular e um foi selecionado para realização de um ensaio de monitorização em contínuo.

A cidade de Ponta Delgada, situada no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, está implementada essencialmente sobre material de natureza basáltica (*s. l.*), não sendo conhecida neste sistema vulcânico nenhuma manifestação de vulcanismo secundário.

O ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior de um edifício foi efetuado no período compreendido entre 29 de junho de 2022 e 13 de outubro de 2023. O local de amostragem corresponde a um edifício público, localizado no centro da cidade de Ponta Delgada, e a amostragem foi efetuada na cave. Neste edifício foram ainda medidos parâmetros ambientais como a humidade relativa, a temperatura e a pressão barométrica no ar interior. Aos dados obtidos neste ponto de amostragem foi adicionada a informação dos parâmetros meteorológicos obtidos pelas estações permanentes do IPMA, situadas no Observatório Afonso Chaves e no aeroporto, num período compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023. De maneira a compreender e filtrar a influência destes fatores externos na variação da concentração de radão foi efetuada a análise de regressão múltipla aos dados log-transformados, através da aplicação do método *Stepwise*, e a análise espectral, através da utilização do filtro FFT (*Fast Fourier Transform*), às séries temporais de dados obtidas.

Os valores de concentração de radão obtidos variaram entre 8 e 1851 Bq/m³, tendo os valores mais elevados sido medidos nos meses de verão. O modelo de regressão foi aplicado ao período compreendido entre 13 de agosto de 2022 e 13 de agosto de 2023, por se tratar do período com o registo de dados de todas as variáveis em análise. No modelo proposto as variáveis com significância estatística são a humidade relativa, a temperatura e a pressão barométrica no ar interior, explicando 37,0% das variações dos dados log-transformados da

concentração de radão no ar interior do edifício. Os resíduos calculados correspondem às variações, que não sendo explicadas pelo modelo, podem estar associadas a parâmetros que não estão a ser analisados. A análise espectral aplicada no local de amostragem permitiu identificar variações cíclicas diárias e sazonais. A análise aplicada aos dados obtidos permitiu a identificação de variações cíclicas diárias associadas a um e dois ciclos por dia. O espectrograma calculado para este período de amostragem confirmou estas variações cíclicas diárias associadas a um e dois ciclos por dia, demonstrando ainda a presença de variações sazonais. A análise das baixas frequências, por seu lado, permitiu o reconhecimento de variações periódicas associadas a 341, 137 e 76 dias. A aplicação da função *Transfer* permitiu a identificação das variáveis velocidade do vento e temperatura no ar exterior como sendo as que apresentam correlação superior a 0,4 com a concentração de radão no ar interior associado a variações de um ciclo por dia. A humidade relativa, a pressão barométrica e a temperatura no ar exterior também apresentam correlação superior a 0,4 com a concentração de radão no ar interior, mas associado a variações de dois ciclos por dia.

A monitorização regular da concentração de radão no ar interior de edifícios localizados na cidade de Ponta Delgada contemplou a realização de duas campanhas, uma foi efetuada nos meses de verão e outra no inverno. A área amostrada corresponde à área urbana da cidade de Ponta Delgada, englobando total ou parcialmente as freguesias de Santa Clara, São José, São Sebastião e São Pedro. Constatou-se que os valores de concentração de radão medidos foram superiores na campanha realizada no verão quando comparadas com os registados no inverno. A média anual calculada da concentração de radão no ar interior dos edifícios da cidade de Ponta Delgada variou entre 23 e 576 Bq/m³. Cerca de 27% dos edifícios amostrados apresentam valores médios anuais de concentração de radão superiores ao limite recomendado na legislação nacional (300 Bq/m³). A análise da distribuição espacial da concentração média anual calculada da concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados permitiu identificar duas áreas onde os valores registados são superiores ao limite previsto da legislação nacional.

A análise dos dados obtidos na cartografia da concentração de radão no ar interior de edifícios e dos dados obtidos no ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior de um edifício permitiu detetar uma concordância na variação sazonal observada, onde os valores de concentração de radão são mais elevados no verão que no inverno, contrariamente ao descrito em diversos estudos. A variação sazonal atípica, comparando com a maioria dos estudos disponíveis na literatura, veio reforçar a importância deste tipo de estudo para compreensão da variação temporal do radão no ar interior de edifícios. As variações observadas, variações cíclicas diárias e sazonais são resultado da influência de vários fatores meteorológicos. A realização deste trabalho permitiu confirmar que a presença de radão no ar interior de edifícios localizados na cidade de Ponta Delgada pode ser de facto superior ao limite

previsto na legislação nacional, salientado a importância deste tipo de estudo em regiões vulcânicas, mesmo em sistemas vulcânicos que pela natureza dos produtos emitidos, não se esperaria que a presença deste gás fosse significativa. Dada a natureza radioativa do radão e o seu potencial cancerígeno, estudos como os aqui realizados são fundamentais para a compreensão da variação de radão no tempo e no espaço em ambientes interiores, de forma a melhor proteger as populações que a ele possam estar expostas.

Estudar o gás radão e o seu impacto na saúde humana é de grande importância. Através da realização de estudos para monitorização da qualidade do ar interior, complementados com dados dos parâmetros meteorológicos, obtém-se informações que servirão como base para a implementação de estratégias eficazes de mitigação e um melhor planeamento do ordenamento de território, assim como para a consciencialização do público em geral e formulação de políticas para minimizar potenciais riscos à saúde causados pelo radão.

É importante, assim, prosseguir com o desenvolvimento de estudos relacionados com o radão quer no que diz respeito à qualidade do ar interior, contribuindo assim para minimizar potenciais impactos em termos de saúde pública, quer à monitorização sismovulcânica, dado tratar-se de um sistema vulcânico ativo. Deste modo, sugerem-se como futuros trabalhos:

- (i) Elaborar uma carta geológica detalhada da área em estudo de modo a entender as pequenas variações que possam existir na composição das rochas e/ou minerais existentes na área.
- (ii) Prosseguir com a monitorização regular da concentração de radão no ar interior dos edifícios. A expansão da aplicação deste tipo de estudo a outras áreas possibilitará uma compreensão mais abrangente deste problema em termos de saúde pública.
- (iii) Elaborar estudos sobre a eficácia de medidas de mitigação, avaliando os benefícios em termos de aumento da expectativa de vida e analisando o custo/benefício associado à implementação destas medidas.
- (iv) Realizar a cartografia da concentração de radão no solo na área de estudo e estender a mesma a todo o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. Essa cartografia permitirá conhecer a variação espacial deste gás e definir o ruído de fundo da desgaseificação difusa do radão neste sistema vulcânico, tendo assim aplicação em termos de a) ordenamento do território; b) mitigação do risco, através da definição de zonas para aplicação de medidas de mitigação preventivas e c) monitorização sismovulcânica.
- (v) Estabelecer um plano de monitorização para as duas zonas identificadas na cartografia realizada como tendo médias anuais de concentração de radão acima do limite previsto na legislação nacional, através da realização de ensaios de monitorização contínua que se prolonguem por períodos de um ano de modo a) a

confirmar as médias anuais identificadas; b) a confirmar a sazonalidade identificada e c) a identificar os parâmetros meteorológicos responsáveis pelas variações observadas.

- (vi) Promover a consciencialização e esclarecer as diversas entidades governamentais e a população em geral sobre os potenciais perigos de residir em áreas de desgaseificação difusa e sobre as medidas de mitigação que podem ser adotadas.

BIBLIOGRAFIA

- ADEMOLA, J. A., OJENIRAN, O. R. (2017). Radon-222 from diferente sources of water and the assessment of health hazard. *Journal of Water & Health*. 15, 97-102. Doi: 10.2166/wh.2016.073
- AGOSTINHO, J. (1936). Tectónica, Sismicidade e Vulcanismo das Ilhas dos Açores. *Açoriana*. I(2), pp. 87-98
- AGUIAR, S. (2018). *Contribuição para o estudo da estratigrafia dos vulcões Fogo e Furnas (S. Miguel, Açores): Implicações para a sua história eruptiva recente*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores, 158p.
- AKBARI, K., MAHMOUDI, J., & GHANBARI, M. (2013). Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house. *Journal of Environmental Radioactivity*, 116, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.08.013>
- ALBUQUERQUE, B., SOUZA, R., SOUZA, D., DANTAS, V., & PETTA, R. (2021). A Influência de Variáveis Meteorológica na Concentração do Gás Radônio na Atmosfera Baixa em Duas Áreas com Fitofisionomias Distintas no Planalto da Borborema. *Revista Brasileira de Climatologia*, 29, 573–601. <https://doi.org/10.5380/abclima>
- ALLARD, P., CARBONNELLE, J., DAJLEVIC, D., BRONEC, J., MOREL, P., ROBÈ, M. C., MAURENAS, J. M., FAIVRE-PIERRET, R., MARTIN, D., SABROUX, J. C., & ZETTWOOG, P. (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, 351(6325), 387–391. <https://doi.org/10.1038/351387a0>
- ALPARONE, S., BEHNCKE, B., GIAMMANCO, S., NERI, M., & PRIVITERA, E. (2005). Paroxysmal summit activity at Mt. Etna (Italy) monitored through continuous soil radon measurements. *Geophysical Research Letters*, 32, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL023352>
- AL-SHBOUL, K. F., (2023). Unraveling the complex interplay between soil characteristics and radon surface exhalation rates through machine learning models and multivariate analysis. *Environmental Pollution*. 336, 0269-7491

Al-TAMIMI, M. H., & ABUMURAD, K. M. (2001). Radon anomalies along faults in North of Jordan. In *Radiation Measurements*, 32, 397-400

ANDERSEN, C. E., SØGAARD-HANSEN, J., MAJBORN, B. (1994). Soil Gas and Radon Entry into a Simple Test Structure: Comparison of Experimental and Modelling Results. *Radiation Protection Dosimetry*, 56, 151–155. Doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a082441

APPLETON, J. D. (2005). Radon in Air and Water. In Selinus, O.; Alloway, B.; Centeno, J. A.; Finkelman, R. B.; Fuge, R.; Lindh, U e Smedley, P. (Eds), *Essentials of Medical Geology – Impacts of the Natural Environment on Public Health*. Springer Netherlands, 239-277. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_11

AQUILINA, N. J., FENECH, S. (2019). The Influence of Meteorological Parameters on Indoor and Outdoor Radon Concentrations: A Preliminary Case Study. *Journal of Environmental Pollution and Control*, 2.

ARVELA, H., HOVING, P. (1993). Finnish experiences in indoor radon mitigation. *Science of The Total Environment*. Vol. 272, No. 1-3, pp 169.174. Doi: 10.1016/S0048-9697(01)00688-X

BAEZA, A., GARCÍA-PANIAGUA, J., GUILLÉN, J., MONTALBÁN, B. (2018). Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study. *Science of the Total Environment*, 610–611, 258–266. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.056

BAHTIJARI, M., STEGNAR, P., SHEMSIDINI, Z., AJAZAJ, H., HALIIMI, Y., VAUPOTIČ, J., KOBAL, I. (2007). Seasonal variation of indoor air radon concentration in schools in Kosovo. *Radiation Measurements*, 42, 286–289. Doi: 10.1016/j.radmeas.2006.09.001

BARROS-DIOS, J. M., BARREIRO, M. A., RUANO-RAVINA, A., FIGUEIRAS, A. (2002). Exposure to Residential Radon and Lung Cancer in Spain: A Population-based Case-Control Study. *American Journal of Epidemiology*, 156, 548–555. doi: 10.1093/aje/kwf070

BARRIOS-DIOS, J. M., RUANO-RAVINA, A., GASTELU-ITURRI, J., FIGUEIRAS, A. (2007). Factors underlying residential radon concentration: Results from Galicia, Spain. *Environmental Research*, 103, 185–190. doi: 10.1016/j.envres.2006.04.008

BAUBRON, J. C.; ALLARD, P.; SABROUX, J. C.; TEDESCO, D.; TOUTAIN, J. P. (1991) – Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of the Geological Society*, London, 148, 571-576.

BELETE, G. D., SHIFERAW, A. M. (2022). A Review of Studies on the Seasonal Variation of Indoor Radon-222 Concentration. *Oncology Reviews*. Vol. 16, 10570. Doi: 10.3389/or.2022.10570

BENÀ, E., CIOTOLI, G., RUGGIERO, L., COLETTI, C., BOSSEW, P., MASSIRONI, M., MAZZOLI, C., MAIR, V., MORELLI, C., GALGARO, A., MOROZZI, P., TOSITTI, L., SASSI, R. (2022). Evaluation of tectonically enhanced radon in fault zones by quantification of the radon activity index. *Scientific Reports*, 12. doi: 10.1038/s41598-022-26124-y

BENÀ, E., CIOTOLI, G., PETERMANN, E., BOSSEW, P., RUGGIERO, L., VERDI, L., HUBER, P., MORI, F., MAZZOLI, C., SASSI, R. (2023). A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure. *Science of the Total Environment*. 912, 0048-9697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169569

BONFORTE, A., FEDERICO, C., GIAMMANCO, S., GUGLIELMINO, F., LIUZZO, M., NERI, M. (2013). Soil gases and SAR measurements reveal hidden faults on the sliding flank of Mt. Etna (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 251, 27–40. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.08.010

BONOTTO, D. M.; PADRON-ARMADA, P. C. (2008) – Radon and progeny (²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi) in urban water-supply systems of São Paulo State, Brazil. *Applied Geochemistry*, 23, 2829-2844.

BOOTH, B., CROASDALE, R., & WALKER, G. P. L. (1978). A quantitative study of five thousand years of volcanism on Sao Miguel, Azores. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 288, 271–319. <https://doi.org/10.1098/rsta.1978.0018>

BOSSEW, P., & LETTNER, H. (2007). Investigations on indoor radon in Austria, Part 1: Seasonality of indoor radon concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 98, 329–345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.06.006>

BOSSEW, P., CINELLI, G., CIOTOLI, G., CROWLEY, Q. G., DE CORT, M., MADINA, J. E., GRUBER, V., PETERMANN, E., TOLLEFSEN, T. (2020). Development of a Geogenic Radon Hazard Index - Concept, History, Experiences. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 4134. Doi: 10.3390/ijerph17114134

BRANCO, R., CRUZ, J. V., SILVA, C., COUTINHO, R., ANDRADE, C., ZANON, V. (2021). Radon (^{222}Rn) occurrence in groundwater bodies on São Miguel Island (Azores archipelago, Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 80:609. Doi: 10.1007/s12665-021-09906-x

BUCCI, S., PRATESI, G., VITI, M. L., PANTANI, M., BOCHICCHIO, F., VENOSO, G. (2011). Radon in workplaces: first results of an extensive survey and comparison with radon in homes. *Radiation Protection Dosimetry*, 145, 2–3, 202–205. Doi: 10.1093/rpd/ncr040

BURTON, M., NERI, M., CONDARELLI, D. (2004). High spatial resolution radon measurements reveal hidden active faults on Mt. Etna. *Geophysical Research Letters*, 31. <https://doi.org/10.1029/2003GL019181>

BURTON, M., ALLARD, P., MURÉ, F., LA SPINA, A. (2007). Magmatic Gas Composition Reveals the Source Depth of Slug-Driven Strombolian Explosive Activity. *Science*, 317, 227–230. <https://doi.org/10.1126/science.1141900>

CALIRO, S., VIVEIROS, F., CHIODINI, G., FERREIRA, T., 2015. Gas geochemistry of hydrothermal fluids of the S. Miguel and Terceira Islands, Azores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 168: 43-57.

CANADA MORTGAGE AND HOUSING CORPORATION (CMHC). (1997). *Radon: A Guide for Canadian Homeowners*. Health Canada. Cat. No. NH15-180/1997E, 47p.

CARMO, R. (2013). *Estudos de neotectónica na ilha de São Miguel, uma contribuição para o estudo do risco sísmico no arquipélago dos Açores*. Tese de Doutoramento no Ramo de Geologia, especialidade em Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 307p.

CARMO, R., MADEIRA, J., FERREIRA, T., QUEIROZ, G., HIPÓLITO, A. (2015). Volcano-tectonic structures of São Miguel Island, Azores. In *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Gaspar, J. L., Guest, J. E., Duncan, A. M., Barriga, F. J. A. S. & Chester, D. K. (eds). *Geological Society*, 44, 65-86

CARVALHO, F. P. (2009). RADÃO E EDIFÍCIOS. Qualidade do ar interior. *CAPTAR: Ciência e Ambiente Para Todos*, 1, 127–135.

CAVALLO, A., GADSBY, K., & REDDY, T. A. (1996). Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses. *Environment International*, Vol. 22, S1073–S1078. Doi: 10.1016/S0160-4120(96)00221-8

ČELIKOVIĆ, I., PANTELIĆ, G., VUKANAC, I., NIKOLIĆ, J. K., ŽIVANOVIĆ, M., CINELLI, G., GRUBER, V., BAUMANN, S., CIOTOLI, G., PONCELA, L. S. Q., RÁBAGO, D. (2022). Overview of Radon Flux Characteristics, Measurements, Models and Its Potential Use for the Estimation of Radon Priority Areas. In *Atmosphere*, Vol. 13, Issue 12. MDPI. <https://doi.org/10.3390/atmos13122005>

CHIRKOV, A. M. (1975). Radon as a possible criterion for predicting eruptions as observed at Karymsky volcano. *Bulletin Volcanologique*, 39, 126–131. <https://doi.org/10.1007/BF02596952>

CHOUBEY, V. M.; BARTARYA, S. K.; RAMOLA, R. C. (2000) – Radon in Himalayan springs: a geohydrological control. *Environmental Geology*, 39, 523-530.

CIGOLINI, C., SALIERNO, F., GERVINO, G., BERGESE, P., MARINO, C., RUSSO, M., PRATI, P., ARIOLA, V., BONETTI, R., BEGNINI, S. (2001). High-resolution radon monitoring and hydrodynamics of Mount Vesuvius. *Geophysical Research Letters*, 28, 4035–4038. Doi: 10.1029/2000GL012775

CIOLINI, R., MAZED, D. (2010). Indoor radon concentration in geothermal areas of central Italy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 712–716. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.04.012>

CIOTOLI, G., ETIOPE, G., GUERRA, M., LOMBARDI, S. (1998). The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys. *Tectonophysics*. 301, 321-332. PII: S0040-1951(98)00220-0

CIVISA (2023) – Carta de Sismicidade dos Açores, no período de 1980 a 2023.

CLOUVAS, A., XANTHOS, S., AANTONOPOULOS-DOMIS, M. (2007). Pilot study of indoor radon in Greek workplaces. *Radiation Protection Dosimetry*, 124, 68–74. Doi: 10.1093/rpd/ncl548

COLE, P. D.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; GASPAR, J. L.; DUNCAN, A. M.; GUEST, J. E. (1995) – An historic subplinian/phreatomagmatic eruption: the 1630 AD eruption of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69, 117-135.

COLE, P. D.; GUEST, J. E.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J. M.; GASPAR, J. L.; FERREIRA, T.; DUNCAN, A. M. (1999) – Styles of volcanism and volcanic hazards on Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 39-53.

CORDEIRO, S., COUTINHO, R., CRUZ, J. V. (2012). Fluoride content in drinking water supply in São Miguel volcanic island (Azores, Portugal). *Science of the Total Environment*. 432, 23-36. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.05.070

DARBY, S., HILL, D., AUVINEN, A., BARROS-DIOS, J. M., BAYSSON, H., BOCHICCHIO, F., DEO, H., FALK, R., FORASTIERE, F., HAKAMA, M., HEID, I., KREIENBROCK, L., KREUZER, M., LAGARDE, F., MÄKELÄINEN, I., MUIRHEAD, C., OBERAIGNER, W., PERSHAGEN, G., RUANO-RAVINA, A., DOLL, R. (2004). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>

DARBY, S. (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ Publishing Group*. 330:7485, 223.

Decreto-Lei n.º 23/2016 de 3 de junho – Diário da República N.º 107 | 1ª Série

Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de dezembro – Diário da República N.º 232 | 1ª Série

DELMELLE, P., STIX, J. (2000). Volcanic Gases. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 803-815.

DENMAN, A. R., CROCKETT, R. G. M., GROVES-KIRKBY, C. J., PHILLIPS, P. S., GILLMORE, G. K., WOOLRIDGE, A. C. (2007). The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon - A case study in Northamptonshire, UK. *Environment International*, 33, 34–44. Doi: 10.1016/j.envint.2006.06.021

DEWEY, R., NOWAK, M., MURAINÉ, D. (1994). Radon Mitigation Effectiveness in New Construction: Passive and Active Techniques. *International Radon Symposium*. V – 1.1

DIAS, A. (1945). O sismo de 1522 em S. Miguel. *Insulana*, 1(4), 5–15.

DIAS, N.A., MATIAS, L., LOURENÇO, N., MADEIRA, J., CARRILHO, F., GASPAR, J.L., 2007. Crustal seismic velocity structure near Faial and Pico Islands (Azores), from local earthquake tomography. *Tectonophysics*, 445, 301-317. Doi: 10.1016/j.tecto.2007.09.001.

DI CARLO, C., AMPOLLINI, M., ANTIGNANI, S., CAPRIO, M., CACCIA, B., BOCHICCHIO, F. (2023) Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies. *Environmental Pollution*. 327, 0269-7491. Doi: 10.1016/j.envpol.2023.121480

Diretiva 2013/59/EURATOM DO CONSELHO de 5 de dezembro de 2013. L 13/1.

DORMAN, L. I. (2004). Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground. *Springer Netherlands*. Vol. 303. Doi: 10.1007/978-1-4020-2113-8

DRAPER, N., SMITH, H. (1981). Applied Regression Analysis (2nd ed.). *Jonh Wiley & Sons Inc*. doi: 10.1002/9781118625590

DU, L., LEIVO, V., PRASAUSKAS, T., TÄUBEL, M., MARTUZEVICIUS, D., HAVERINEN-SHAUGHNESSY, U. (2019). Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. *Indoor air*. 29, 686-697. Doi: 10.1111/ina.12555

ESAN, D. T., SRIDHAR, M. K. C., OBED, R., AJIBOYE, Y., AFOLABI, O., OLUBODUN, B., ONI, O. M. (2020). Determination of Residential Soil Gas Radon Risk Indices Over the Lithological Units of a Southwestern Nigeria University. *Scientific Reports*, 10:7368. Doi: 10.1038/s41598-020-64217-8

ESCARTÍN, J., CANNAT, M., POULIQUEN, G., RABAIN, A., LIN, J. (2001) Crustal thickness of V-shaped ridges south of the Azores: Interaction of the Mid-Atlantic Ridge (36°-39°N) and the Azores hot spot. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 106, No. B10, 21719-21735

ETIOPE, G., & MARTINELLI, G. (2002). Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129, 185-204.

EUROPEAN COMMISSION. (1999). Radiation Protection 112 – Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. 24p.

EUROPEAN COMMISSION, Cinelli, G., De Cort, M., Tollefsen, T. (eds.) (2019). European atlas of natural radiation. *Publications Office of the European Union*. Doi: 10.2760/46388

FARREL, J., HUSEN, S. SMITH, R. 2009. Earthquake swarm and the b-value characterization of the Yellowstone volcano-tectonic system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188, 260–276, Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.08.008

FERREIRA, T. (2000) – Caracterização da atividade da ilha de São Miguel (Açores): vulcanismo basáltico recente e zonas de desgaseificação. Avaliação de riscos. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 248p.

FERREIRA, M., COELHO, M. J. P. (2006). *O radão nos edifícios - minimização da perigosidade*. 70-91. <http://hdl.handle.net/10284/1885>

FERREIRA, T., GOMES, A., GASPAR, J. L., & GUEST, J. (2015). Distribution and significance of basaltic eruptive centres: São Miguel, Azores. In *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores archipelago)*. Gaspar, J.L.; Guest, J.E.; Duncan, A.M.; Barriga, F.J.A.S.; Chester, D.K. (eds.), Geological Society, London, Memoirs, 44, 197-211. DOI: <http://doi.org/10.1144/M44.15>.

FRANCISCO, P. W., GLOSS, S., WILSON, J., ROSE, W., SUN, Y., DIXON, S. L., BREYSSE, J., TOHN, E., JACOBS, D. E. (2020). Radon and moisture impacts from interventions integrated with housing energy retrofits. *Indoor Air*, 30, 147–155. Doi: 10.1111/ina.12616

FREUND, R.J.; WILSON, W.J. (1998) - Regression analysis. Statistical modeling of a response variable. *Academic Press.*, 444p.

FREUND, R. J., WILSON, W. J., Sa, P. (2006). Regression Analysis: Statistical Modeling of a Response Variable (T. Singer, Ed.; 2nd ed.). *Elsevier Inc.*

- FRIEDLANDER, I., 1929. Os Açores (trad. J. Agostinho). Açoreana, I(1), 39-58
- FRUMKIN, H., SAMET, J. (2001). *Radon*. 51, 337–344. Doi: [10.3322/canjclin.51.6.337](https://doi.org/10.3322/canjclin.51.6.337)
- FRUTUOSO, G. (1522-1591) – Livro quarto das Saudades da Terra. In Frutuoso, G. “Saudades da Terra”. 2ª Ed. Ponta Delgada, 1981, V. II.
- FRUTUOSO, G. (1586). *Saudades da Terra* (2nd ed.). Historiografia Açoriana, séc. 15-16.
- GALLELLI, G., PANATTO, D., LAI, P., ORLANDO, P., RISSO, D. (1998). Relevance of Main Factors Affecting Radon Concentration in Multi-storey Buildings in Liguria (Northern Italy). *J. Environ. Radioactivity* Vol. 39, No. 2, 117-128. Doi: 1016/S0265-931X(97)00056-8
- GAO, G. W. W.; TANG, Y.H.; TAM, C. M.; GAO, X.F. (2008) – Anti-radon coating for mitigating indoor radon concentration. *Atmospheric Environment*, 42, 8634-8639.
- GARCÍA, B. P., CHINCHÓN PAYÁ, S., MORALES, M., & BARBUDO, M. (2011). Radioactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. *CEMENTO HORMIGÓN*, N° 946, 34–50.
- GARCÍA-TALAVERA, M.; QUINTANA, B.; GARCÍA-DÍEZ, E.; FERNÁNDEZ, F. (2001) – Studies on radioactivity in aerosols as a function of meteorological variables in Salamanca (Spain). *Atmospheric Environment*, 35, 221-229.
- GARMIN. (2019). *GPSMAP 86 Owner's Manual*. 56p.
- GASPAR, J.L., QUEIROZ, G., PACHECO, J.M., FERREIRA, T., WALLENSTEIN, N., ALMEIDA, M.H., COUTINHO, R., 2003. *Basaltic lava ballons produced during the 1998-2001 Serreta Submarine Ridge eruption (Azores)*. In: White, J.D.L., Smellie, J.L. e Clague, D.A. (Eds.) *Explosive Subaqueous Volcanism*, Geophysical Monograph 140, AGU, Washington D.C., 379 p.
- GASPAR, J. L., QUEIROZ, G., FERREIRA, T., MEDEIROS, A. R., GOULART, MEDEIROS, J. (2015a). Earthquakes and volcanic eruptions in the Azores region: geodynamic implications from major historical events and instrumental seismicity. In *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society. 44, 33-49

GASPAR, J., GUEST, J. E., QUEIROZ, G., PACHECO, J., PIMENTEL, A., GOMES, A., MARQUES, R., FELPETO, A., FERREIRA, T., WALLENSTEIN, N. (2015b). Eruptive frequency and volcanic hazards zonation in São Miguel Island, Azores. In *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Gaspar, J. L., Guest, J. E., Duncan, A. M., Barriga, F. J. A. S. & Chester, D. K. (eds.). *Geological Society*. 44, 155-166.

GIAMMANCO, S., SIMS, K. W. W., & NERI, M. (2007). Measurements of ^{220}Rn and ^{222}Rn and CO_2 emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): Implications for gas transport and shallow ground fracture. *Geochemistry Geophysics, Geosystems*, 8, Q10001.

GREENMAN, D. J., ROSE, A. W. (1995). Factors controlling the emanation of radon and thoron in soils of the eastern U.S.A.. *Chemical Geology*. 129, 1-14

GROVES-KIRKBY, C. J., DENMAN, A. R., CROCKETT, R. G. M., PHILIPS P. S., GILMORE, G. K. (2006). Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK. *Science of the Total Environment*. 367, 191-202

GRUBER, V., BOSSEW, P., DE CORT, M., TOLLEFSEN, T. (2013). The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*. 33, 51-60. Doi: 10.1088/0952-4746/33/1/51

GRÜNTAL, G. (ed.) 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 pp.

GT-Analytic KEG. (2003). *Ramon 2.2 radon monitor manual*. Austria, 5p

GUEST, J. E., GASPAR, J. L., COLE, P. D., QUEIROZ, G., DUNCAN, A. M., WALLENSTEIN, N., FERREIRA, T., PACHECO, J. M. (1999). Volcanic geology of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 1-29

HAN, Y., HAN, Y. (2002) – Time-variation of the near 5-month period of sunspot numbers. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 47, No. 23, 1969-1973.

HARRIS, F. J. (1978) – On the use of the windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, 51-83.

HASBROUCK, S. (1983) – *Radon in water and air*. Cooperative Extension Service, University of Maine, the Land and Water Resources Center, Maine Department of Human Services and Maine Medical Center Research Department

HELMENSTINE, A. (2023). Difference Between Ionizing and Non-Ionizing Radiation. *Science Notes*.

HENSCHER, D. B., SCOTT, A. G. (1991). Causes of elevated post mitigation radon concentrations in basement houses having extremely high pre-mitigation levels. *International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology*. 30p.

HENSCHER, D. B. (1993). Radon Reduction Techniques for Existing Detached Houses - Technical Guidance (Third Edition) for Active Soil Despressurization Systems. *U.S. Environmental Protection Agency*. 334p.

HENSCHER, D. B. (1995). Re-entrainment and dispersion of exhausts from indoor radon reduction systems. Analysis of tracer gas data. *Indoor Air*, 5, 270–284.

HERNÁNDEZ, P.; PÉREZ, N.; SALAZAR, J.; REIMER, M.; NOTSU, K.; WAKITA, H. (2004) – Radon and helium in soil gases at Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, 59-76.

HUBBARD, L. M., HAGBERG, N., ENFLO, A. (1992). Temperature Effect on Radon Dynamics in Two Swedish Dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, 45, No. 1–4, 381–386. Doi: 10.1093/rpd/45.1-4.381

HUSEN, S., TAYLOR, R., SMITH, R. HEALSER, H. 2004. Changes in geyser eruption behavior and remotely triggered seismicity in Yellowstone National Park produced by the 2002 M 7.9 Denali fault earthquake, Alaska. *Geology*, 32, 537–540, Doi: 10.1130/G20381.1

IMMÈ, G., LA DELFA, S., LO NIGRO, S., MORELLI, D., PATANÈ, G. (2006a). Soil radon concentration and volcanic activity of Mt. Etna before and after the 2002 eruption. *Radiation Measurements*, 41, 241–245. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.06.008>

IMMÈ, G., LA DELFA, S., LO NIGRO, S., MORELLI, D., PATANÈ, G. (2006b). Soil radon monitoring in the NE flank of Mt. Etna (Sicily). *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 624–629. Doi: 10.1016/j.apradiso.2005.12.007

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. (1979). Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. *Pergamon Press*. Vol. 2, No. 3/4.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. (1996). Radiological Protection and Safety in Medicine. *Pergamon*. Vol. 26, No. 2.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. (2015). Protection of the Public Against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. No. SSG-32.

JIRÁNEK, M., & ROVENSKÁ, K. (2010). Limited applicability of cost-effectiveness and cost-benefit analyses for the optimization of radon remedial measures. *Journal of Hazardous Materials*, 182, 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.051>

JOHNOVÁ, K., THINOVA, L., GIAMMANCO, S. (2014). Revealing the hidden faults in the SE flank of Mt. Etna using radon in-soil gas measurement. *Radiation Protection Dosimetry*, 160, No. 1–3, 70–73. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu092>

JONES, A. P. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33, 4535-4564.

KARPIŃSKA, M., MNICH, Z., KAPALA, J. (2004). Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*. 77, 101–109. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.02.005

KESKIKURU, T., KOKOTTI, H., LAMMI, S., KALLIOLSKI, P. (2001). Effect of various factors on the rate of radon entry into two different types of houses. *Building and Environment* Vol. 36, 1091-1098.

KITTO, M. E. (2005). Interrelationship of indoor radon concentrations, soil-gas flux, and meteorological parameters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 264, No. 381–385.

KÖLBEL, L., KÖLBEL, T., MAIER, U., SAUTER, M., SCHÄFER, T., WIEGAND, B. (2020). Water–rock interactions in the Bruchsal geothermal system by U–Th series radionuclides. *Geothermal Energy*, 8:24, 33p. Doi: 10.1186/s40517-020-00179-4

KREWSKI, D., LUBIN, J. H., ZIELINSKI, J. M., ALAVANJA, M., CATALAN, V., FIELD, R. W., KLOTZ, J. B., LÉTOURNEAU, E. G., LYNCH, C. F., LYON, J. I., SANDLER, D. P., SCHOENBERG, J. B., STECK, D. J., STOLWIJK, J. A., WEINBERG, C., WILCOX, H. B. (2005). Residential Radon and Risk of Lung Cancer - A Combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies. *Epidemiology*. Vol. 16, No. 2, 137-145. Doi: 10.1097/01.ede.0000152522.80261.e3

LA DELFA, S., IMMÈ, G., LO NIGRO, S., MORELLI, D., PATANÈ, G., & VIZZINI, F. (2007). Radon measurements in the SE and NE flank of Mt. Etna (Italy). *Radiation Measurements*, 42, 1404–48. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.06.004>

LAUGHTON, A. S., WHITMARSH, R. B., RUSBY, J. S. M., SOMERS, M. L., REVIE, J., MCCARTNEY, B. S., & NAFE, J. E. (1972). A Continuous East-West Fault on the Azores-Gibraltar Ridge. *Nature*, 237, 217–220. <https://doi.org/10.1038/237217a0>

LEITE, L. (2008). *Concepção de um sistema de alvenaria à base de blocos de betão com bagacina vocacionado para a construção nos Açores*. Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 164p.

LOURENÇO, N., MIRANDA, J. M., LUIS, J. F., RIBEIRO, A., MENDES VICTOR, L. A., MADEIRA, J., NEEDHAM, H. D. (1998). Morpho-tectonic analysis of the Azores Volcanic Plateau from a new bathymetric compilation of the area. In *Marine Geophysical Researches*. 20, 141-156.

LOWRY, J D. (1983) Removal of radon from water using granular activated carbon adsorption. *Annual report*. United States.

MACHADO, F. (1959). Submarine pits of the azores plateau. *Bulletin Volcanologique*, No. 21, 109–116.

MACHADO, F. (1966). Anomalias das intensidades do terramoto de S. Miguel (Açores) em 1522. *Boletim Do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico Da Faculdade de Ciências*, 10, 109–117.

MADEIRA, J., BRUM DA SILVEIRA, A., HIPÓLITO, A., CARMO, R. (2005). Active tectonics in the central and eastern Azores islands along the Eurasia – Nubia boundary: a

review. In *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Gaspar, J. L., Guest, J. E., Duncan, A. M., Barriga, F. J. A. S. & Chester, D. K. (eds.). *Geological Society*. 44, 15-32.

MADRUGA, M. J., MIRÓ, C., REIS, M., SILVA, L. (2019). Radiation Exposure from Natural Radionuclides in Building Materials. *Radon Protection Dosimetry*. Vol. 185, No. 1, 57-65. DOI: 10.1093/rpd/ncy256

MARQUES, R., QUEIROZ, G., PACHECO, P., ARAÚJO, I., GOULART, C. (2015) – Plano Especial de Emergência de Movimentos de Vertente em Vila Franca do Campo (PEERMV-VFC) – Fase 4 – Caracterização das áreas vulneráveis ao perigo de movimentos de vertente e identificação dos elementos expostos relativamente à suscetibilidade.

MEDEIROS, J. (2018). *Avaliação do Impacto de Erupções Explosivas no Vulcão do Fogo na Economia do Turismo do Concelho de Vila Franca do Campo (Ilha de São Miguel, Açores)*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores, 165p.

MEDEIROS, J. (2004). *Contribuição para o estudo dos riscos geológicos no concelho de Vila Franca do Campo (S. Miguel, Açores) e suas implicações em termos de planeamento de emergência*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 167p.

MNICH, Z., KARPIŃSKA, M., KAPALA, J., KOZAK, K., MAZUR, J., BIRULA, A., ANTONOWICZ, K. (2004). Radon concentration in hospital buildings erected during the last 40 years in Białystok, Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 75, 225–232. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2003.12.006

MOORE, R. C. (1990) – Volcanic geology and eruption frequency, São Miguel, Azores. *Bulletin of Volcanology*, 52, 602-614.

MOORE, R. B. (1991). *Geologic map of Sao Miguel, Azores*. Doi: 10.3133/i2007

MORELLI, D., MARTINO, S. IMMÈ, G., LA DELFA, S., LO NIGRO, S., & PATANÈ, G. (2006). - Evidence of soil radon as tracer of magma uprising in Mt. Etna. *Radiation Measurements*, 41, 721–725.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (US) COMMITTEE. (1999). Health Effects of Exposure to Radon. *National Library of Medicine. National Academies Press*. Doi: 10.17226/5499

NEEDHAM, H., FRANCHETEAU, J., 1974. Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36° 48' north. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 22, 29-43.

NERI, M., BEHNCKE, B., BURTON, M., GALLI, G., GIAMMANCO, S., PECORA, E., PRIVITERA, E., & REITANO, D. (2006). Continuous soil radon monitoring during the July 2006 Etna eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L24316.

NERI, M., GIAMMANCO, S., FERRERA, E., PATANÈ, G., ZANON, V. (2011). Spatial distribution of soil radon as a tool to recognize active faulting on an active volcano: The example of Mt. Etna (Italy). *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 863–870.

NERI, M., FERRERA, E., GIAMMANCO, S., CURRENTI, G., CIRRINCIONE, R., PATANÈ, G., ZANON, V. (2016). Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. *Scientific Reports*, 6:24581. Doi: 10.1038/srep24581

NEVES, L. F., PEREIRA, A. C. (2004). Radioatividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. *GEONOVAS*. No. 18, 103-114.

NEVES, L. J. P. E.; BARBOSA, S. M.; PEREIRA, A. J. S. C. (2009) – Indoor radon periodicities and their physical constraints: a study in the Coimbra region (Central Portugal). *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 896-904.

NUHU, H., HASHIM, S., SALEH, M. A., SANUSI, M. S. M., ALOMARI, A. H., JAMAL, M. H., ABDULLAH, R. A., HASSAN, S. A. (2021). Soil gas radon and soil permeability assessment: Mapping radon risk areas in Perak State, Malaysia. *PLOS ONE*, 16. Doi: 10.1371/journal.pone.0254099

NUNES, L. J. R., CURADO, A., LOPES, S. I. (2023). Understanding Seasonal Indoor Radon Variability from Data Collected with a LoRa-Enabled IoT Edge Device. *Applied Sciences*. 13, 4735. Doi: 10.3390/app13084735

OIKAWA, S., KANNO, N., SANADA, T., ABUKAWA, J., HIGUCHI, H. (2006). A survey of indoor workplace radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*. 87, 239–245. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2005.12.001

OMENKA, O. S., RAYMOND, A. (2022). Radon Level and Effects in Public and Residential Places in Nigeria. *Physical Science & Biophysics Journal*, 6, 1–7. Doi: 10.23880/psbj-16000213

OTTON, J. K. (1992). *The Geology of Radon*. U. S. Department of the Interior/U. S. Geological Survey. 32p.

PACHECO, J. M., FERREIRA, T., QUEIROZ, G. WALLENSTEIN, N., COUTINHO, R., CRUZ, J. V., PIMENTEL, A., SILVA, R., GASPAR, J. L., GOULARD, C. (2012). Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores. In *Geologia de Portugal*. Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J. C.. Vol. 2, Escolar Editora, 596-690

PAPAEFTHYMIU, H., MAVROUDIS, A., KRITIDIS, P. (2003). Indoor radon levels and influencing factors in houses of Patras, Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*. 66, 247-260.

PARKS, M. M., CALIRO, S., CHIODINI, G., PYLE, D. M., MATHER, T. A., BERLO, K., EDMONDS, M., BIGGS, J., NOMIKOU, P., & RAPTAKIS, C. (2013). Distinguishing contributions to diffuse CO₂ emissions in volcanic areas from magmatic degassing and thermal decarbonation using soil gas ²²²Rn–δ¹³C systematics: Application to Santorini volcano, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 79, 25-37.

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, 0048-9697. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142291

PHONG THU, H. N., VAN THANG, N., HAO, L. C. (2020). The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion. *Journal of Environmental Radioactivity*, 216. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2020.106189

PORSTENDORFER, J., BUTTERWECK, G., REINEKING, A. (1994). Daily Variation of the Radon Concentration Indoors and Outdoors and the Influence of Meteorological Parameters. *Health Physics*, 67, 283–287.

QUEIROZ, G., GASPAR, J. . L., COLE, P., GUEST, J. E., WALLENSTEIN, N., DUNCAN, A. M., & PACHECO, J. (1995). Erupções vulcânicas no Vale das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores) na primeira metade do século XV. *Açoreana*, 8, 159–165.

QUEIROZ, G. (1997) – *Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel, Açores): História eruptiva e avaliação do Hazard*. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 226p.

QUEIROZ, G., GASPAR, J. L., GUEST, J. E., GOMES, A. ALMEIDA, M. H. 2015. Eruptive history and evolution of Sete Cidades Volcano, São Miguel Island, Azores. In: Gaspar, J. L., Guest, J. E., Duncan, A. M., Barriga, F. J. A. S. & Chester, D. K. (eds) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society, London, Memoirs, 44, 87–104. Doi: 10.1144/ M44.7

RAHMAN, S. U., RAFIQUE, M., MATIULLAH, ANWAR, J. (2010). Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad Capital area, Pakistan. *Building and Environment*, 45, 421–426. Doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.019

RAMOLA, R., KANDARI, M., NEGI, M., CHOUBEY, M. (2000). A Study of Diurnal Variation of Indoor Radon Concentrations. *Journal of Health Physics*. Vol. 35, No. 2, 211-216.

RAO, N. S., SENGUPTA, D. (2010) Seasonal levels of radon and thoron in the dwellings along southern coastal Orissa, Eastern India. *Applied Radiation and Isotopes*. 68, 28-32. Doi: 10.1016/j.apradiso.2009.09.026

REAL, L., LOPES, J., VIEGAS, J., COELHO, A. (2020a). Guia para mitigação da admissão de radão para o interior de edifícios existentes. *Agência Portuguesa do Ambiente*. 479/2020.

REAL, L., LOPES, J., VIEGAS, J., COELHO, A. (2020b). Guia para prevenção da admissão de radão em edifícios novos. *Agência Portuguesa do Ambiente*. 480/2020.

REY, J. F., GOYETTE, S., PERNOT, J. G. (2023). Weather Impacts on Indoor Radon Short-Term Measurements in Switzerland. *Atmosphere*. 14, 1163. Doi: 10.3390/atmos14071163

RILEY, W. J.; GADGIL A. J.; BONNEFOUS, Y. C.; NAZEROFF, W. W. (1996) – The effect of steady winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 7, 1167-1176.

RUANO-RAVINA, A., FIGUEIRAS, A., & BARROS-DIOS, J. M. (2002). Noxious Exposures in Leisure Time and Risk of Lung Cancer. *Epidemiology*, 13, 235–236. Doi: 10.1097/00001648-200203000-00022

SABBARESE, C., AMBROSINO, F., CHIODINI, G., GIUDICEPIETRO, F., MACEDONIO, G., CALIRO, S., DE CESARE, W., BIANCO, F., PUGLIESE, M., ROCA, V. (2020). Continuous radon monitoring during seven years of volcanic unrest at Campi Flegrei caldera (Italy). *Scientific Reports*, 10:9551. Doi: 10.1038/s41598-020-66590-w

SARAD. (2013). User Manual Radon Scout. Versão 12/2013. Dresden. 6p.

SÁNCHEZ, R. P. (2017). *Forma e Radão: Estudo dos efeitos da implantação das construções no terreno, na concentração de gás radão interior*. Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitetura e Urbanismo, Escola Superior Gallaecia, 312p.

SCHUMANN, R. R., GUNDERSEN, L. C. S. (1996). Geologic and Climatic Controls on the Radon Emanation Coefficient. *Environment International*. 22, S439-446

SCHUREMAN, R. R. (1976) – Manual of harmonic analyses and prediction of tides. U. S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Special publication No.98, Washington D. C.: U. S. Government Printing Office. 310p.

SCOTT, A. (1993). Causes of Poor Sealant Performance in Soil-Gas-Resistant Foundations. *Indoor Air*, 3, 376–381. Doi: 10.1111/j.1600-0668.1993.00023.x

SEARLE, R. (1980). Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth and Planetary Science Letters*, 51, 415–434.

SEGOVIA, N., MENA, M. (1999). Soil radon pulses related to the initial phase of volcanic eruptions. *IL NUOVO CIMENTO*. Vol. 22 C, N. 3-4, 275-279.

SHAIKH, A. N., RAMACHANDRAN, T. V., VINOD KUMAR, A. (2003). Monitoring and modelling of indoor radon concentrations in a multi-storey building at Mumbai, India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 67, 15–26. Doi: 10.1016/S0265-931X(02)00144-3

SIINO, M., SCUDERO, S., CANNELLI, V., PIERSANTI, A., & D'ALESSANDRO, A. (2019). Multiple seasonality in soil radon time series. *Scientific Reports*, 9:8610. Doi: 10.1038/s41598-019-44875-z

SILVA, C. (2013). *Estudo da desgaseificação difusa de ²²²Rn: Implicações em termos de monitorização sismovulcânica, recursos geotérmicos e saúde pública*. Tese de Doutoramento em Geologia, especialidade de Vulcanologia, Dep. Geociências, Universidade dos Açores, 376p.

SILVA, C., GASPAR, J. L., & VIVEIROS, F. (2014a). Monitorização dos teores de radão (²²²Rn) no solo e no ar interior de um edifício em Ponta Delgada, São Miguel, Açores *Comunicações Geológicas*. 101, 933-937.

SILVA, C., FERREIRA, T., VIVEIROS, F., ALLARD, P. (2014b). Monitorização dos teores de radão (²²²Rn) no ar interior de edifícios das freguesias das Furnas e Ribeira Quente (Vulcão das Furnas, Açores): avaliação do risco para a saúde pública. *Comunicações Geológicas*. 101, 927-931.

SILVA, C.; VIVEIROS, F.; FERREIRA, T.; GASPAR, J.L.; ALLARD, P. (2015) – Diffuse soil emanations of radon and hazard implications at Furnas Volcano, São Miguel Island (Azores). In *Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores archipelago)*. Gaspar, J.L.; Guest, J.E.; Duncan, A.M.; Barriga, F.J.A.S.; Chester, D.K. (eds.), Geological Society, London, Memoirs, 44, 197-211. DOI: <http://doi.org/10.1144/M44.15>.

SILVA, C., VIVEIROS, F., FERREIRA, T. (2016). Radon (²²²Rn) mitigation actions in a building located at Ponta Delgada, São Miguel, Azores: a case study. *International Conference on Urban Risks*. 867-874

SILVA, C., & VIVEIROS, F. (2020). Monitorização contínua de radão (²²²Rn) no ar interior de um edifício localizado no Vulcão das Furnas durante 2017. *Comunicações Geológicas*. 107, 157-159.

SILVA, R., CARMO, R., MARQUES, R. (2020). Characterization of the tectonic origins of historical and modern seismic events and their societal impact on the Azores Archipelago, Portugal. In Characterization of Modern and Historical Seismic–Tsunamic Events, and Their Global–Societal Impacts. Dilek, Y., Ogawa, Y. and Okubo, Y. (eds). *Geological Society*. 501

SILVEIRA, D. (2002) – *Caracterização da Sismicidade Histórica da Ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: Contribuição para a avaliação do risco sísmico*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 149p.

SINGH, S., MEHRA, R., SINGH, K. (2005). Seasonal variation of indoor radon in dwellings of Malwa region, Punjab. *Atmospheric Environment*. 39, 7761-7767. Doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.08.030

SPASIĆ, D., GULAN, L. (2022). High Indoor Radon Case Study: Influence of Meteorological Parameters and Indication of Radon Prone Area. *Atmosphere*. 13, 2120. Doi: 10.3390/atmos13122120

SPENCER, J. E. (1992) – Radon gas – A Geologic Hazard in Arizona. Arizona Geological Survey, Down-to-Earth, Series 2, 17p

STOREY, M., WOLFF, J.A., NORRY, M.J., MARRINER, G.F., 1989. *Origin of hybrid lavas from Água de Pau volcano, São Miguel, Azores*. In: A.D. Saunders and Norry, M.J. (Eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*, Geol. Soc. Sp. Publ., 42, 161-180.

SYNNOTT, H., POLLARD, D., COLGAN, P. A., FENTON, D. (2004). A Survey of the impact of amending Building Regulations on radon concentrations in Irish homes. In *11th congress of the International Radiation Protection Association (IRPA11), Madrid*

SYNNOTT, H., COLGAN, P. A., HANLEY, O., FENTON, D. (2007). The Effectiveness of Radon Remediation in Irish Schools. *Health Physics*, 92, 50–57. Doi: 10.1097/01.HP.0000234038.25522.98

THOMAS, D. M., CUFF, K. E., COX, M. E. (1986). The association between ground gas radon variations and geologic activity in Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. B12, 12 186–12 198.

TURK, B. H., PRILL, R. J., FISK, W. J., GRIMSRUD, D. T., & SEXTRO, R. G. (1991). Effectiveness of radon control techniques in fifteen homes. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 41, 723–734. Doi: 10.1080/10473289.1991.10466873

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1992). Cavallo, A., Gadsby, K., & Reddy, T. A. *Natural Basement Ventilation as a Radon Mitigation Technique*. 1-7.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). (2000). *Sources of Ionizing Radiation*. Vol. I

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). (2006). *Effects of Ionizing Radiation*. Vol. I

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (2009a) - A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family From Radon. EPA 402-K-09-001, 16p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (2009b) – Home buyer's and seller's guide to radon. EPA 402/K-09/002, 40p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2016). A Citizen's Guide to Radon. The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon. 402/K-12/002.

VALENTE, F., CRUZ., J. V., PIMENTEL, A., COUTINHO, A., ANDRADE, C., NEMÉSIO, J., CORDEIRO, S. (2022). Evaluating the Impact of Explosive Volcanic Eruptions on a Groundwater-Fed Water Supply System: An Exploratory Study in Ponta Delgada, São Miguel (Azores, Portugal). *Water*. 14, 1022. Doi: 10.3390/w14071022

VAN CAMP, M., VAUTERIN, P. (2005). Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences*. 31, 631-640. Doi: 10.1016/j.cageo.2004.11.015

VASCONCELLOS, L. M. [1652] 1982. Informação do que se passou na Ilha de Sam Miguel com os terremotos de terra insendio de fogo desde dezanove do mes de Outubro athe a data desta. In: Canto, E. (ed.) Arquivo dos Açores. Instituto Universitário dos Açores, IX, 422–424

VAUTERIN, P.; VAN CAMP, M. (2011) – Tsoft Manual, version 2.1.6, release date 08-11-2011, Royal Observatory of Belgium, Bruxelles, 58p.

VAUTERIN, P.; VAN CAMP, M. (2015) – Tsoft Manual, version 2.2.4, release date 09-19-2011, Royal Observatory of Belgium, Bruxelles, 61p.

VINSON, D. S., CAMPBELL, T. R., VENGOSH, A. (2008). Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air. *Applied Geochemistry*, 23, 2676–2685.

VIVEIROS, F., GASPAR, J. L., FERREIRA, T., SILVA, C., MARCOS, M., HIPÓLITO, A. (2015). Mapping of soil CO₂ diffuse degassing at São Miguel Island and its public health implications. In *Geological Society Memoir* Vol. 44, No. 1, pp. 185–195. Geological Society of London. Doi: 10.1144/M44.14

VOGT, P. R., JUNG, W. Y. (2003). The Terceira Rift as hyper-slow, hotspot-dominated oblique spreading axis: A comparison with other slow-spreading plate boundaries. *Earth and Planetary Science Letters*. 218, 77-90. Doi: 10.1016/S0012-821X(03)00627-7

WALLENSTEIN, N., DUNCAN, A., GUEST, J. E., ALMEIDA, M. H. (2015). Eruptive history of Fogo Volcano, São Miguel, Azores. In *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Gaspar, J. L., Guest, J. E., Duncan, A. M., Barriga, F. J. A. S. & Chester, D. K. (eds). Geological Society. 44, 105-123.

WALLENSTEIN, N., DUNCAN, A. M., ALMEIDA, H., PACHECO, J. (1998). A erupção de 1563 do Pico do Sapateiro, S. Miguel Açores. *Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia*.

WALLENSTEIN, N. (1999) – *Estudo da história recente e do comportamento eruptivo do vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores)*. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 266p.

WATSON, J. E., CRAWFORD-BROWN, D. (1991). Use of Activated Carbon to Remove Radon from Drinking Water. *USGS Project*. No. 06 (FY89), 29p.

WEBSTER, J. [1821] 1982. A description of the island of St. Michael (Williams, R. P. & C.; eds), Boston. (Trad. César Rodrigues). In: Canto, E. (ed.) *Arquivo dos Açores*. Instituto Universitário dos Açores, XIII.

WESTON, F. (1964). List of recorded volcanic eruptions in the Azores with brief reports. *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Ciências de Lisboa*, 10, pp. 3-18

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

WILLIAMS-JONES, G.; RYMER, H. (2000) – Hazards of volcanic gases. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 997-1004

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2009) – WHO handbook on indoor radon, a public health perspective. 3rd Edition. In Zeeb, H. e Shannoun, F. (Ed.), World Health Organization, 94p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2023) – Ionizing radiation, health effect and protective measures.

XIE, D., LIAO, M., KEARFOTT, K. J. (2015). Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building - A case study. *Radiation Measurements*, 82, 52–58. Doi: 10.1016/j.radmeas.2015.08.008

YAMADA, Y. (2003). Radon exposure and its health effects. In *Journal of Health Science* Vol. 49, 6, 417–422. Doi: 10.1248/jhs.49.417

YOON, J. Y., LEE, J. D., JOO, S. W., KANG, D. R. (2016). Indoor radon exposure and lung cancer: A review of ecological studies. In *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. Vol. 28, 1. *BioMed Central Ltd*. Doi: 10.1186/s40557-016-0098-z

YOUSEF, A. M. M., ZIMAMI, K. (2019) Indoor radon levels, influencing factors and annual effective doses in dwellings of Al-Kharj City, Saudi Arabia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. Vol. 12, No. 1, 460-467.

YU, K. N., LAU, B. M. F., NIKEZIC, D. (2006). Assessment of environmental radon hazard using human respiratory tract models. *Journal of Hazardous Materials*, 132, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.087>

YUILL, G. K., FELLOW, P. E., RICHARD, A., COUGHLIN, J., STUDENT, P. E., ASHRAE, M. (1994). *Reentry of Radon from Mitigation System Outlets*. OR-94-3-1. 1-8.

ZBYSZEWSKI, G. (1959). Alguns casos práticos da utilidade da geologia no estudo da ilha de S. Miguel (Açores). *Academia de Ciências de Lisboa*. 15

ZBYSZEWSKI, G. (1961). ÉTUDE GÉOLOGIQUE DE L'ÎLE DE S. MIGUEL (AÇORES). *Direção Geral Das Minas e Serviços Geológicos*. 79

ZBYSZEWSKI, G., MEDEIROS, A.C., FERREIRA, O.V., ASSUNÇÃO, C.T., 1971. Carta geológica de Portugal, na escala de 1/50 000. Notícia explicativa da folha da ilha Terceira. *Serv. Geol. de Portugal*, 43 p.

ZIMMER, M., ERZINGER, J. (2003). Continuous H₂O, CO₂, ²²²Rn and temperature measurements on Merapi Volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125, 25–38. Doi: 10.1016/S0377-0273(03)00087-8

Mónica Andreia do Carmo Fonseca Maia

Monitorização da concentração de radão (^{222}Rn) em edifícios da cidade de Ponta Delgada: contribuição para o estudo da desgaseificação difusa e implicações para a saúde pública

ANEXOS



UAç
UNIVERSIDADE
DOS AÇORES

Faculdade de Ciências e Tecnologias

Universidade dos Açores

2024

ANEXO I

Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e
diversos parâmetros analisados

ANEXO I

Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e diversos parâmetros analisados

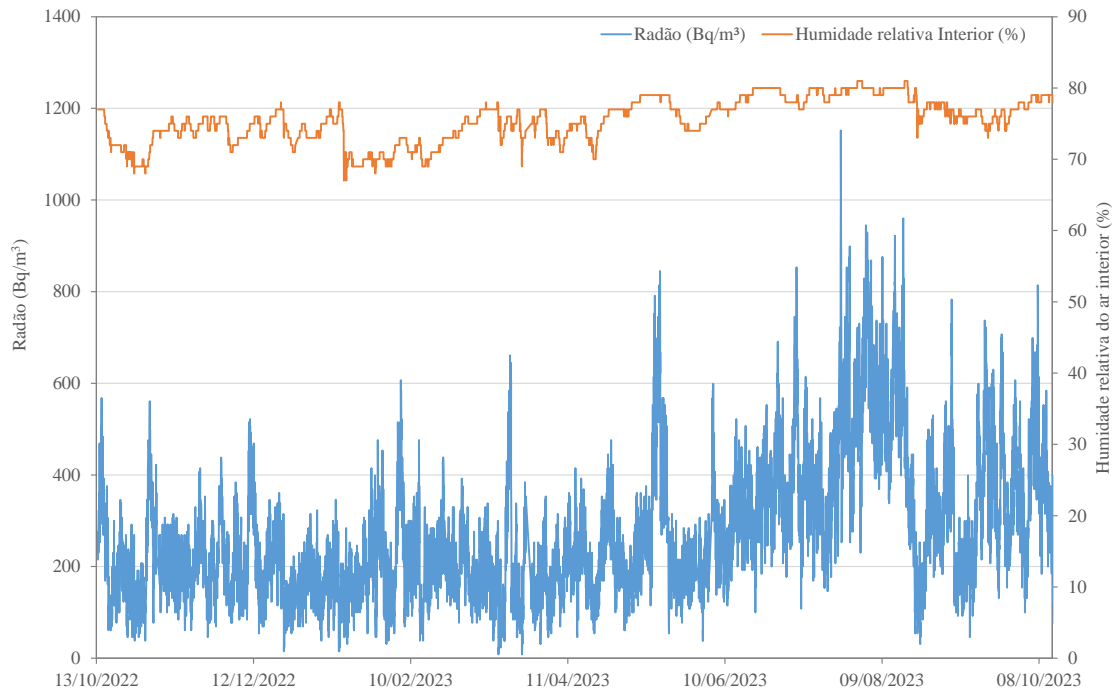


Figura I.1 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da umidade relativa no ar interior para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

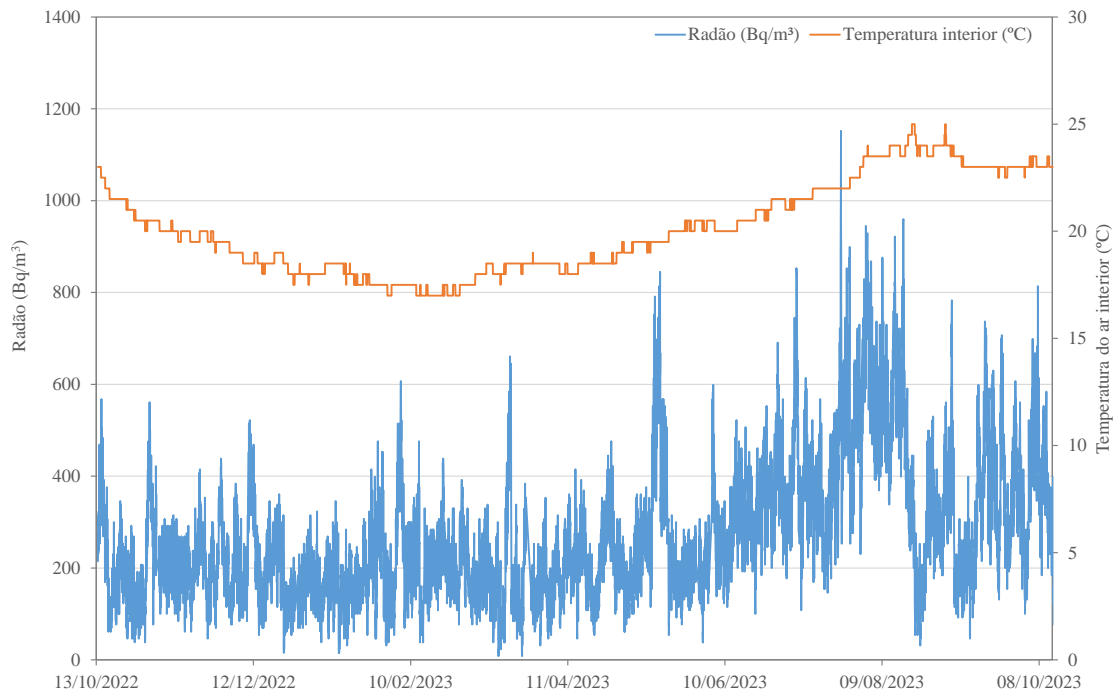


Figura I.2 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da temperatura no ar interior para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

ANEXO I

Varição temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e diversos parâmetros analisados

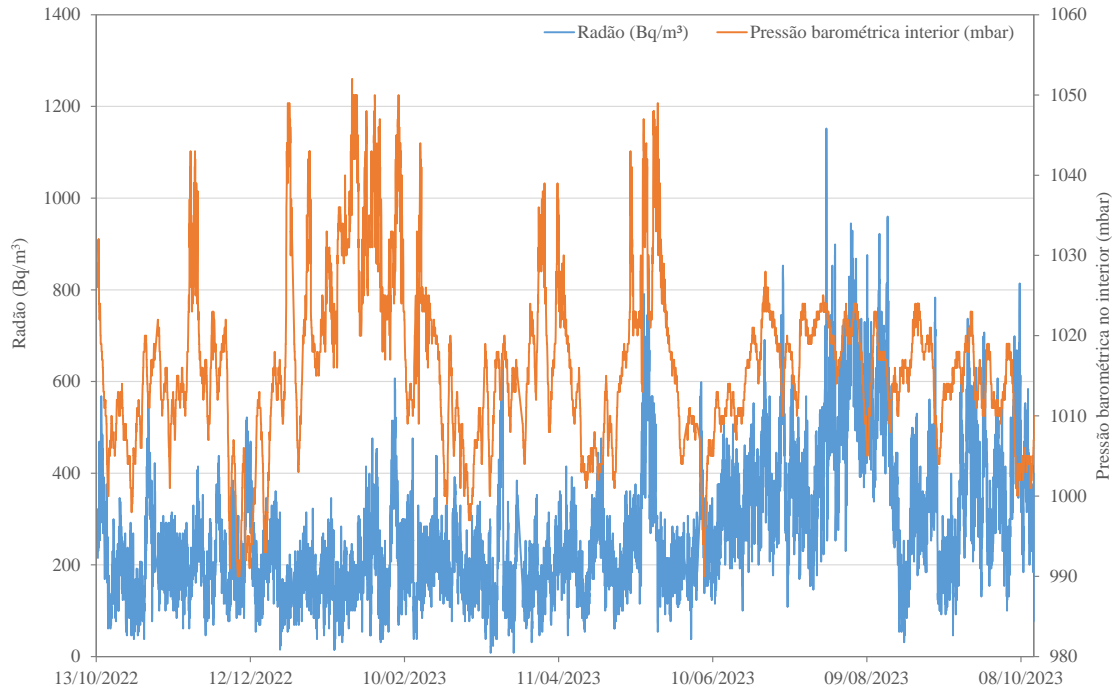


Figura I.3 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da pressão barométrica no interior para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

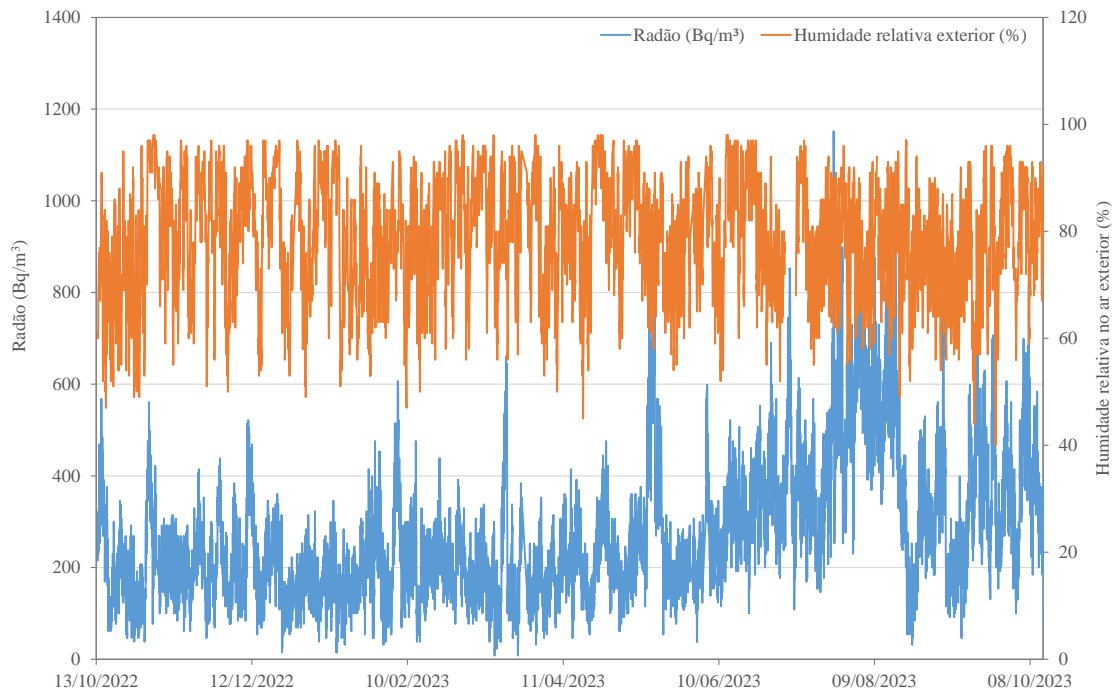


Figura I.4 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da umidade relativa no ar exterior para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

ANEXO I

Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e diversos parâmetros analisados

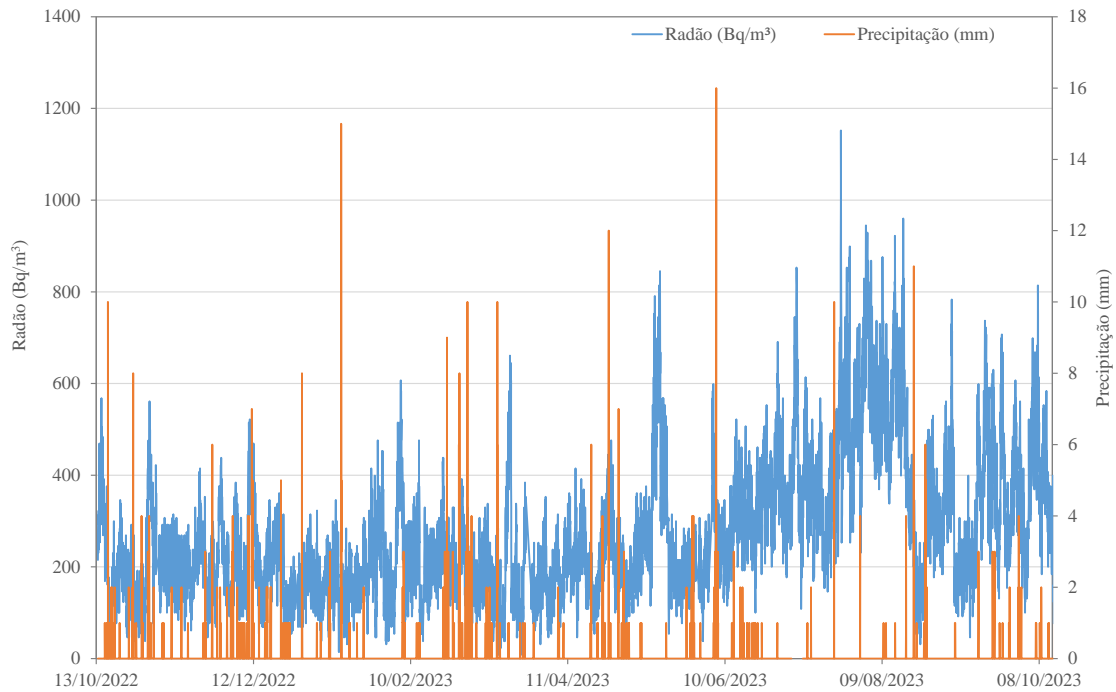


Figura I.5 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da precipitação para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

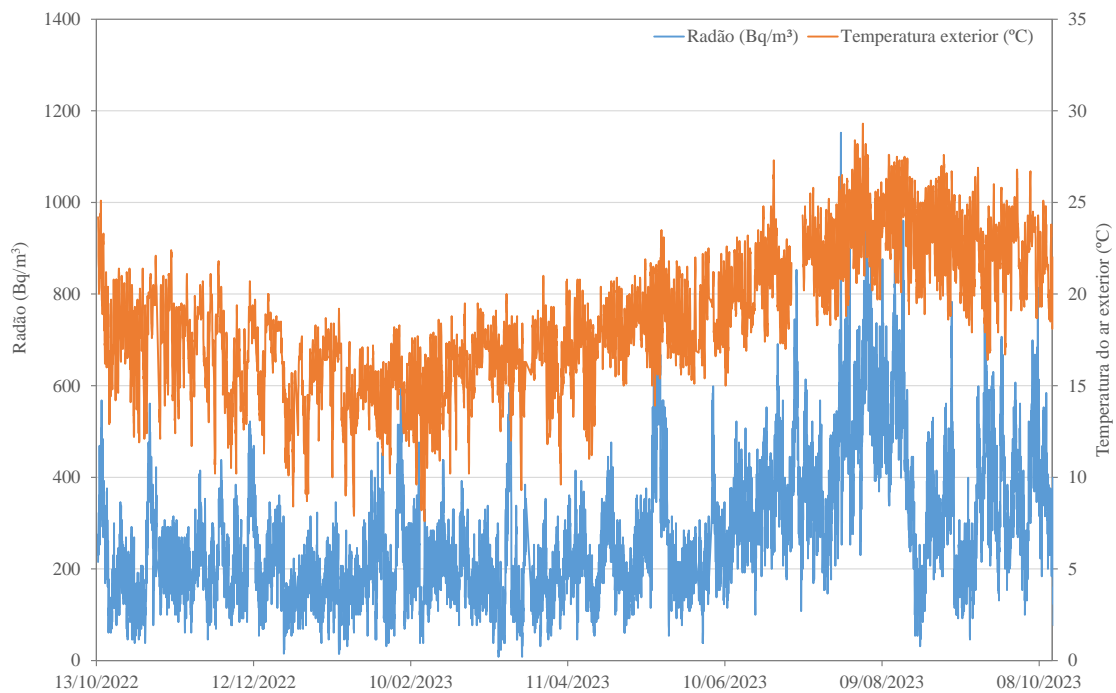


Figura I.6 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da temperatura no ar exterior para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

ANEXO I

Varição temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e diversos parâmetros analisados

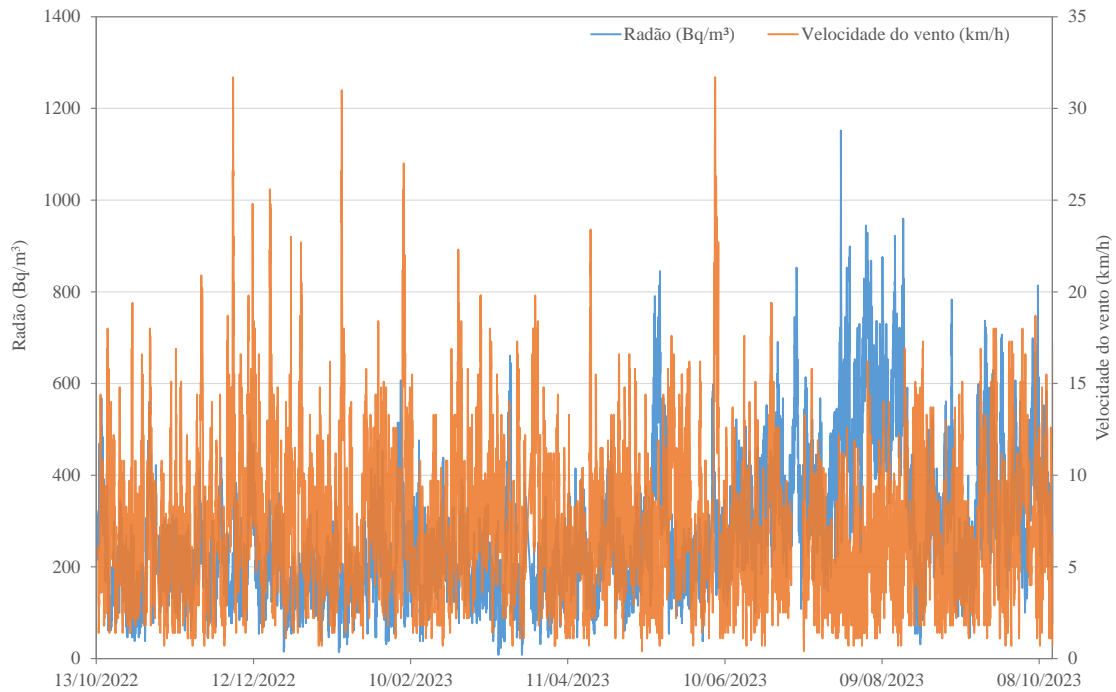


Figura I.7 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da velocidade do vento para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

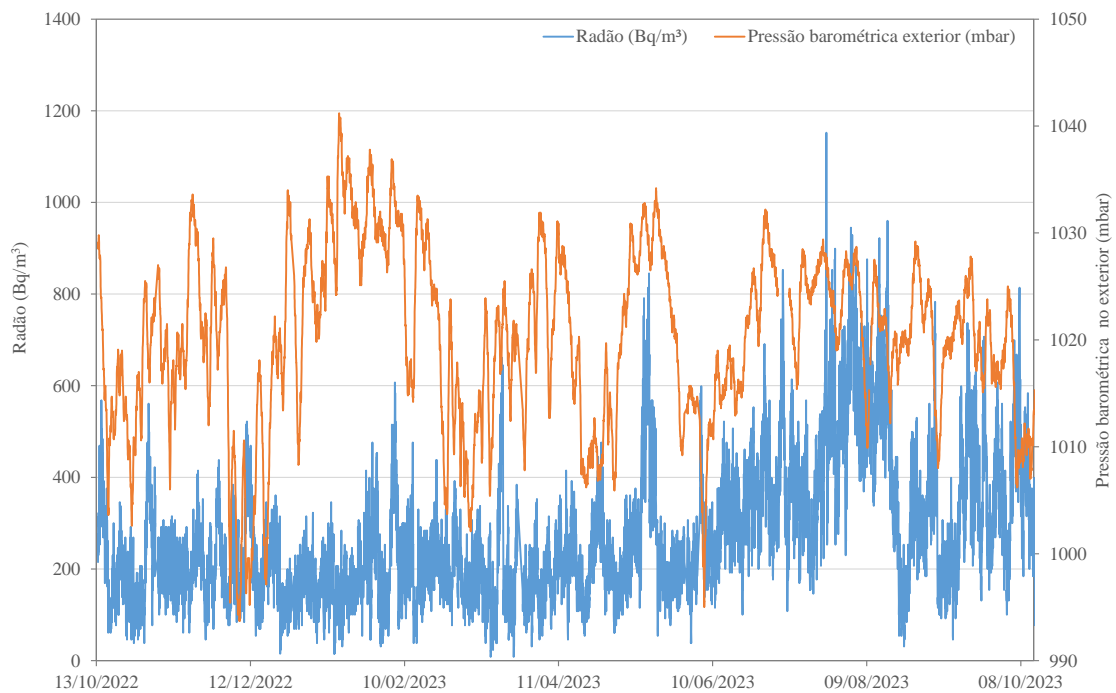


Figura I.8 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e da pressão barométrica no exterior para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

ANEXO I

Varição temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e diversos parâmetros analisados

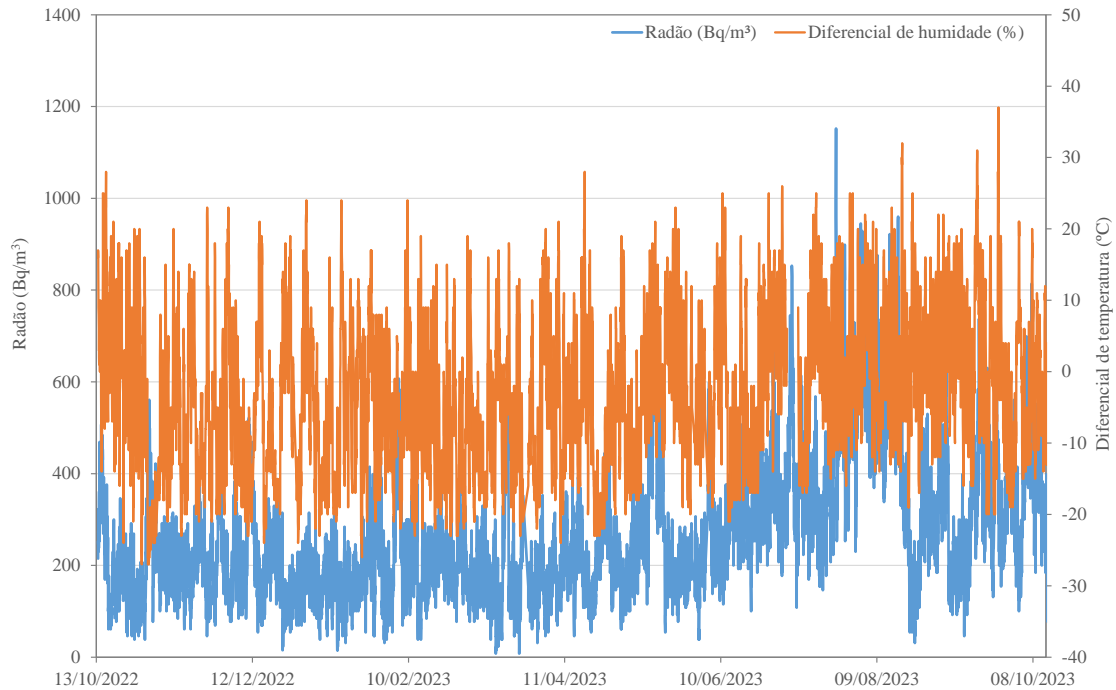


Figura I.9 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e do diferencial de umidade para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

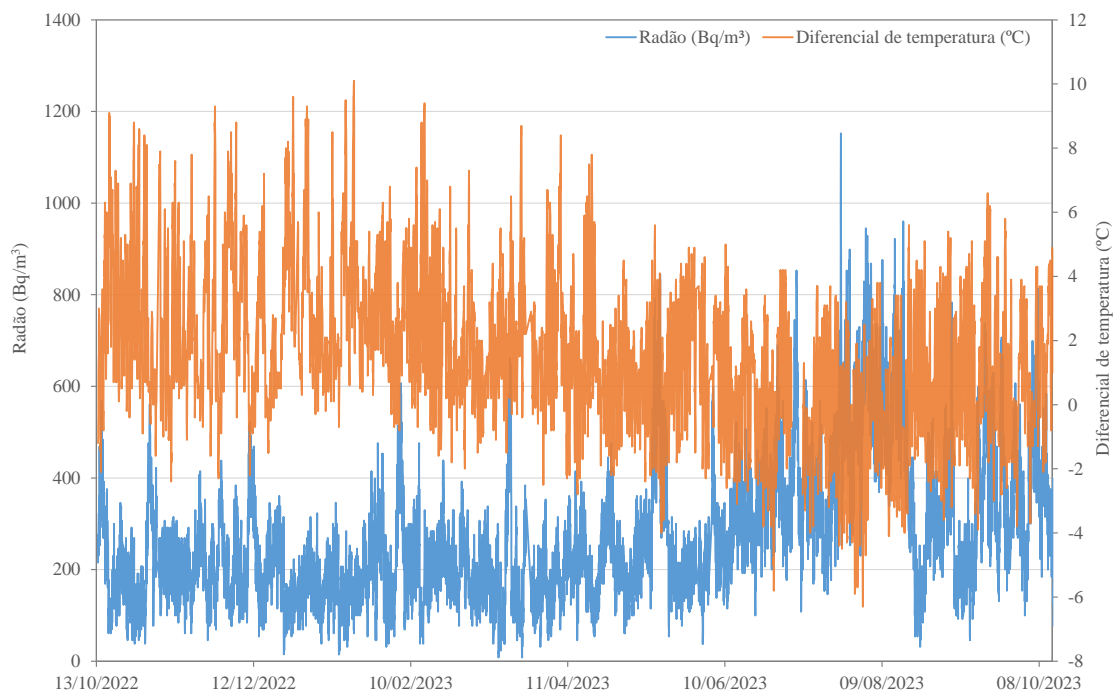


Figura I.10 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e do diferencial de temperatura para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

ANEXO I

Varição temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e diversos parâmetros analisados

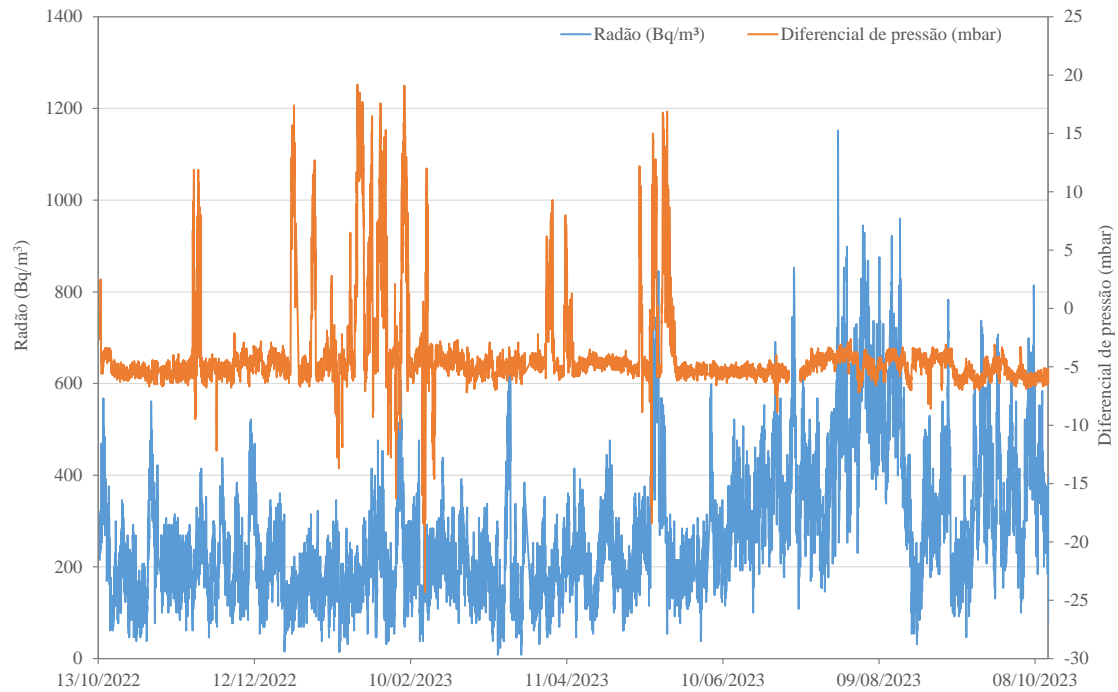


Figura I.11 – Variação temporal da concentração de radão no ar interior do edifício e do diferencial de pressão para o período de amostragem compreendido entre 13 de outubro de 2022 e 13 de outubro de 2023.

ANEXO II

Monitorização contínua no ar interior – Espetros dos parâmetros meteorológicos em análise

ANEXO II

Monitorização contínua no ar interior – Espetros dos parâmetros meteorológicos em análise

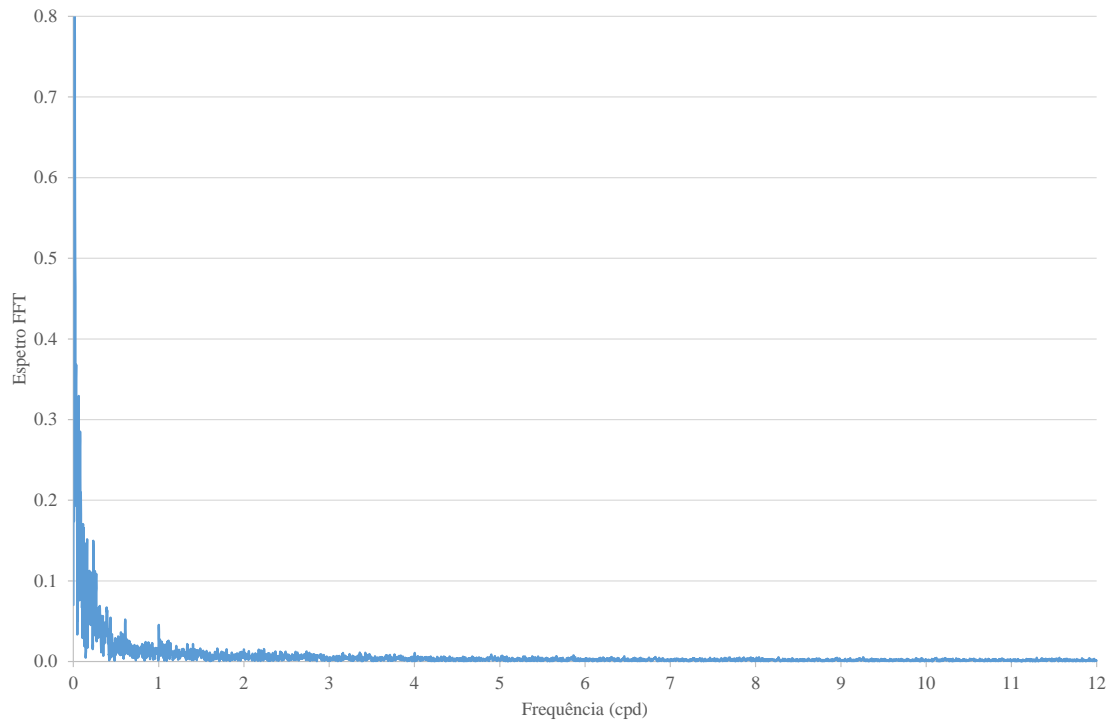


Figura II.1 – Espectro de amplitudes da humidade relativa no ar interior no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

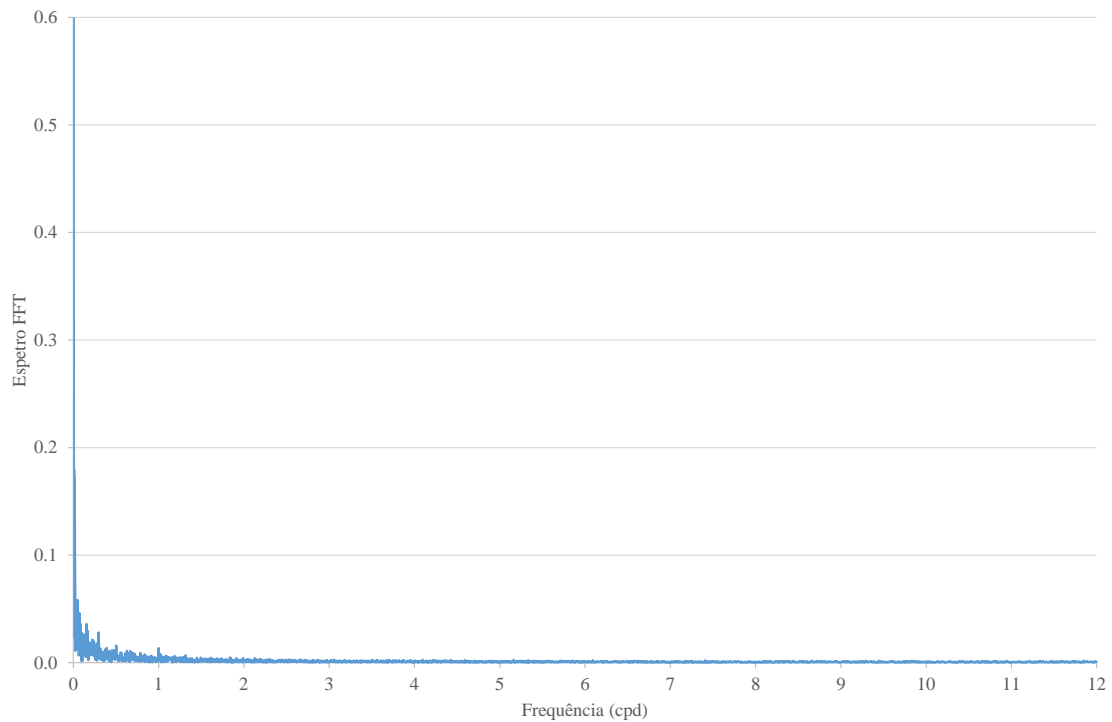


Figura II.2 – Espectro de amplitudes da temperatura no ar interior no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

ANEXO II

Monitorização contínua no ar interior – Espetros dos parâmetros meteorológicos em análise

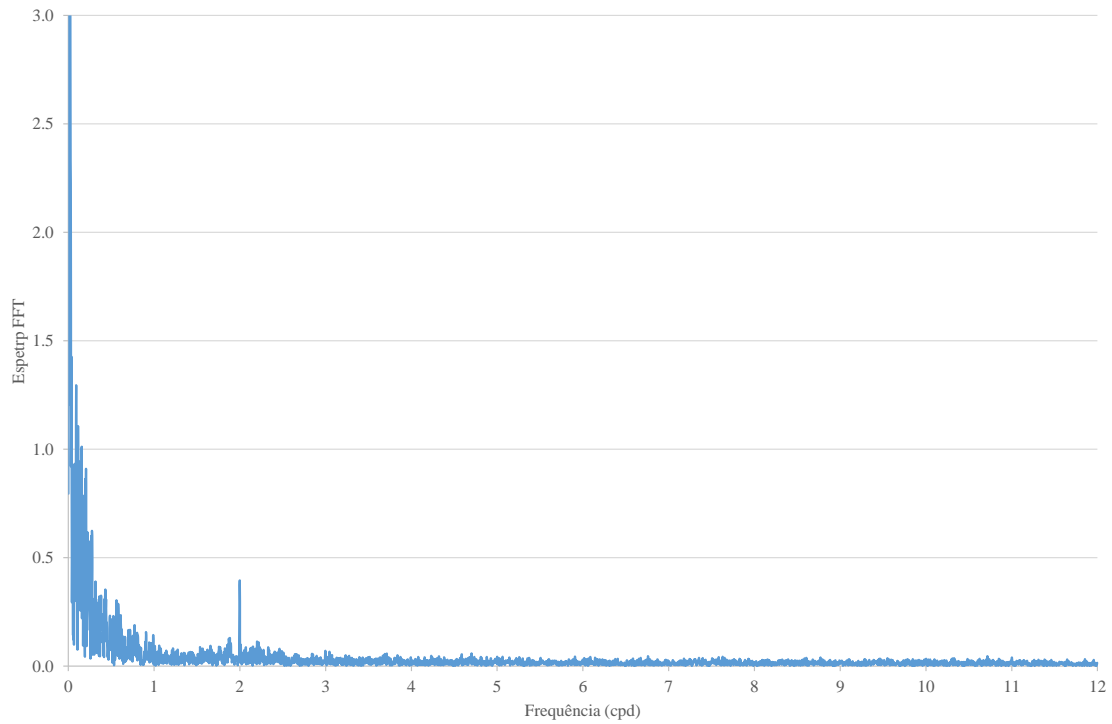


Figura II.3 – Espectro de amplitudes da pressão barométrica no ar interior no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

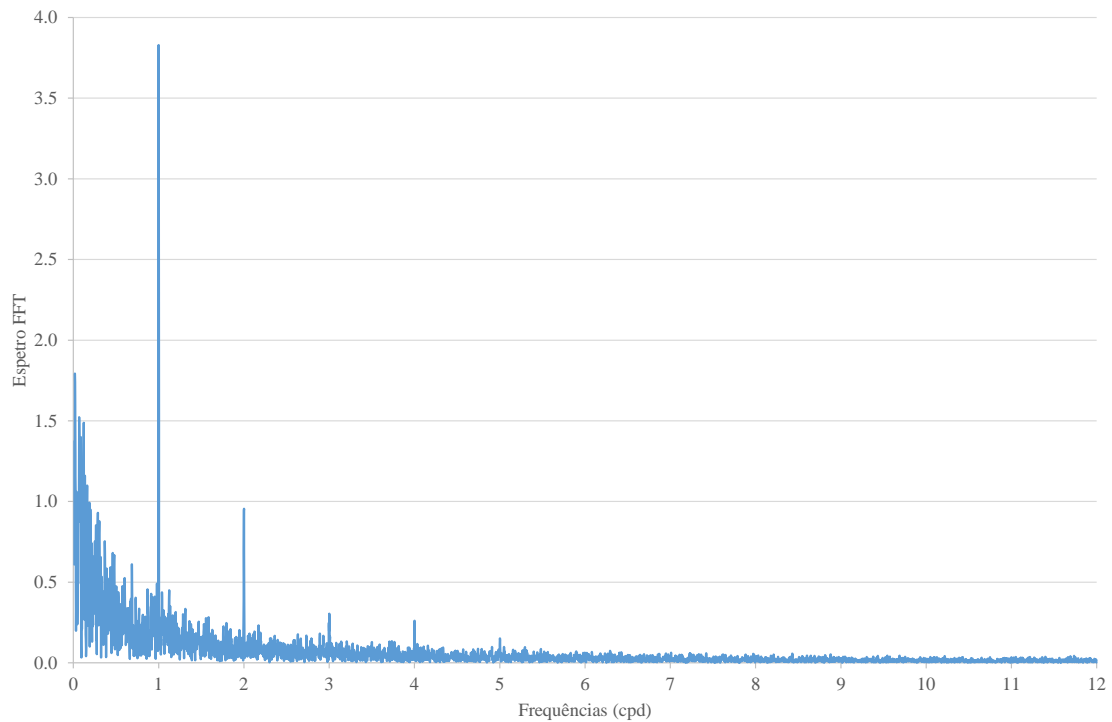


Figura II.4 – Espectro de amplitudes da humidade relativa no ar exterior no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

ANEXO II

Monitorização contínua no ar interior – Espetros dos parâmetros meteorológicos em análise

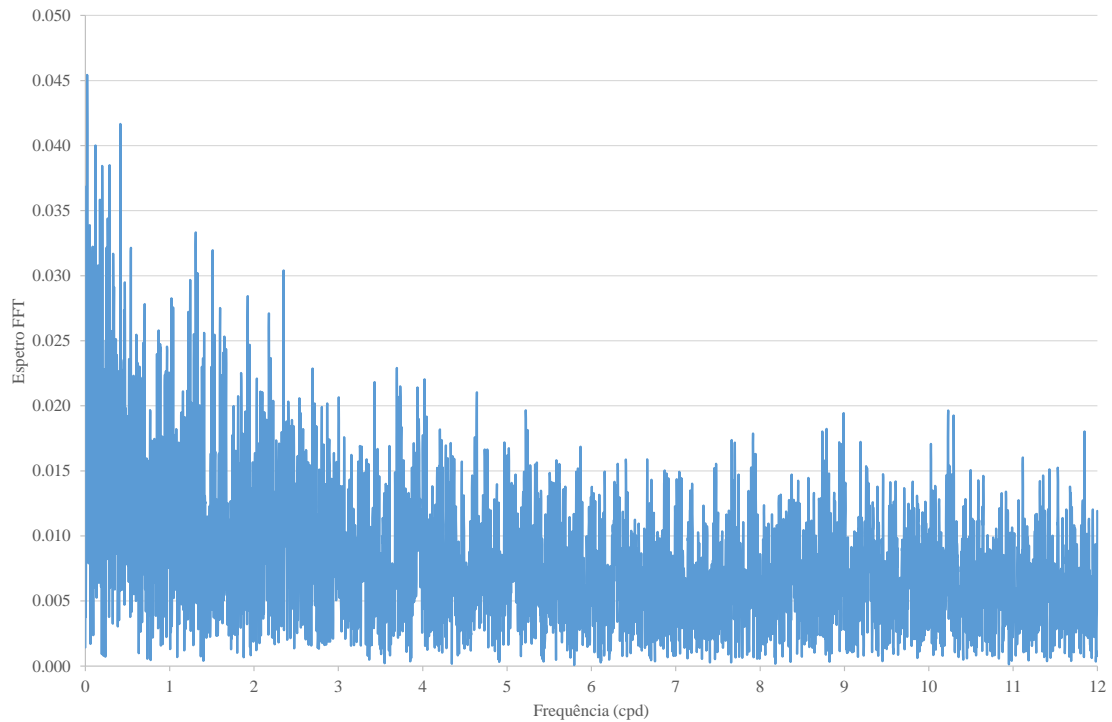


Figura II.5 – Espetro de amplitudes da precipitação no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

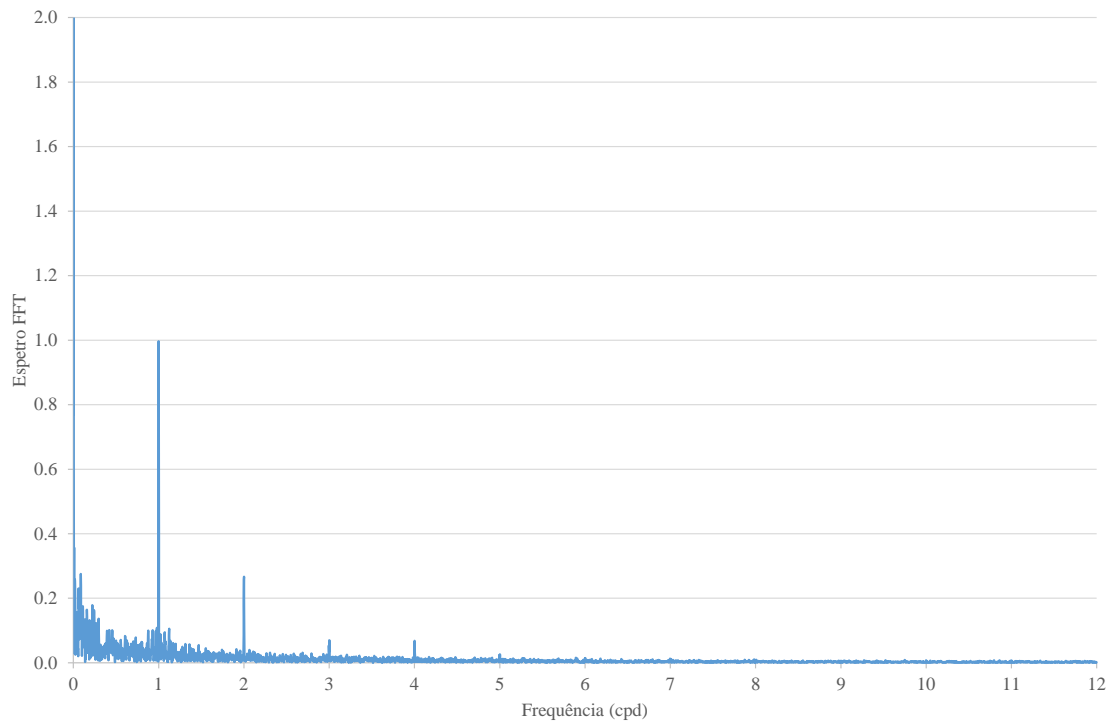


Figura II.6 – Espetro de amplitudes da temperatura no ar exterior no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

ANEXO II

Monitorização contínua no ar interior – Espetros dos parâmetros meteorológicos em análise

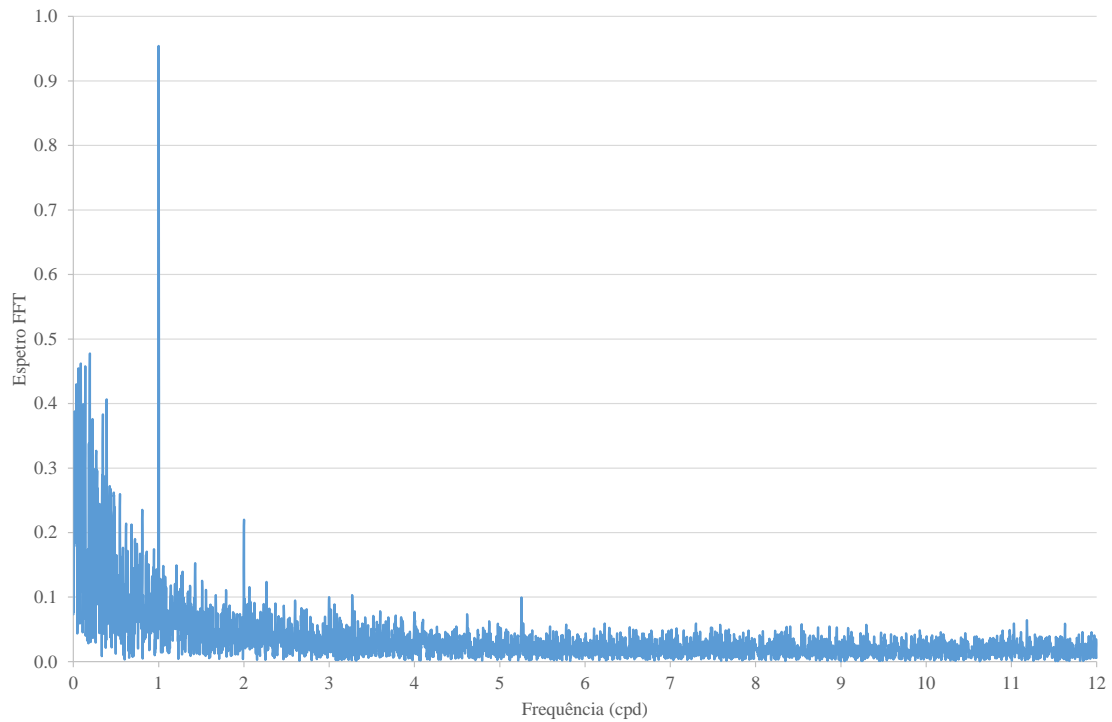


Figura II.7 – Espectro de amplitudes da velocidade do vento no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

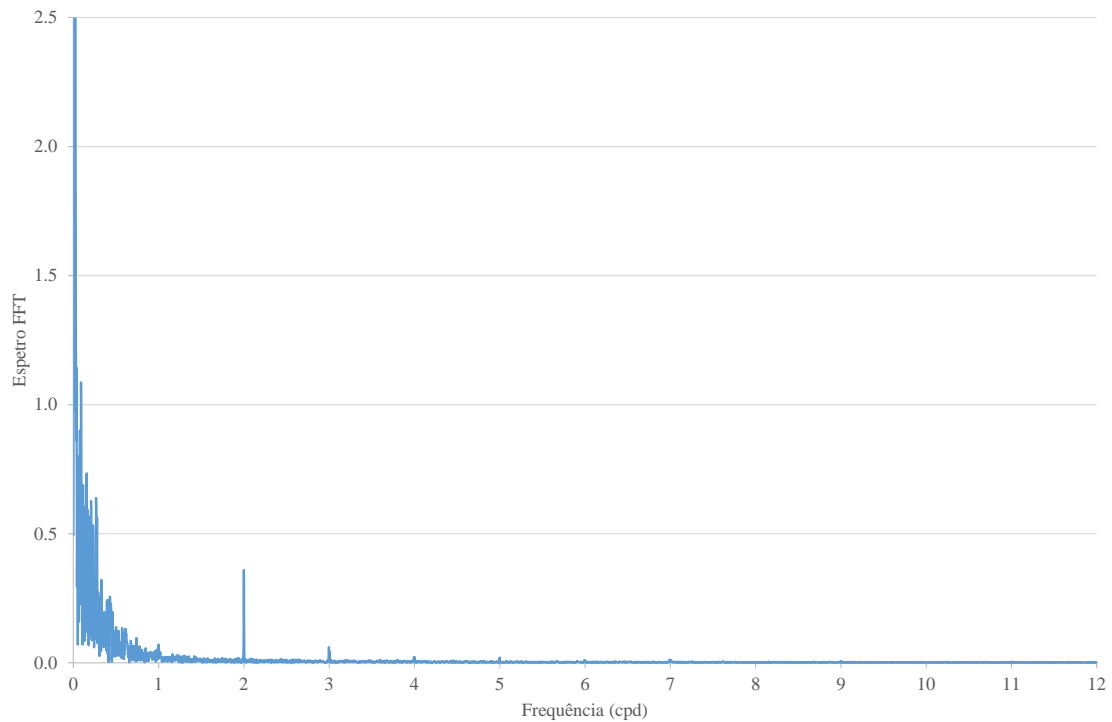


Figura II.8 – Espectro de amplitudes da pressão barométrica no ar exterior no edifício amostrado, para o período compreendido entre 13 de outubro de 2022 a 13 de outubro de 2023.

ANEXO III

Ficha de levantamento das características do edifício

ANEXO III

Ficha de levantamento das características do edifício

Monitorização da qualidade do ar interior (²²²Rn)

1. Habitação

Morada: _____

Localidade: _____ Código Postal: _____

Coordenadas:

M _____ P _____

Número de identificação interno: _____

2. Identificação Proprietário/ Arrendatário

Nome: _____

Habitação: Própria Aluguer

Habitação: Permanente Férias

Contacto:

Telefone: _____ Telemóvel: _____

3. Equipamento

Equipamento: Ramon 2.2

Número de série: _____

4. Características da habitação

Material de Construção: Blocos e cimento Pedra

Caixa-de-ar: Presente Ausente

Cave: Presente Ausente

Número de pisos: _____

Ano de construção: _____

ANEXO III

Ficha de levantamento das características do edifício

Estado de conservação:

1 2 3 4 5

5. Características do local de amostragem

Divisão: Sala Quarto Outra Qual: _____

Piso: Cave Rés-do-chão

Paredes: Blocos e cimento Pedra Madeira Outra Qual: _____

Revestimento das Paredes: Nenhum Estuque/ Reboco Tinta

Papel Outro Qual: _____

Revestimento do chão: Cimento Madeira Mosaico

Alcatifa Outro Qual: _____

Presença de fendas: Sim Não Obs: _____

Ventilação para o exterior: Sim Não

Porta Janela Chaminé Lareira

Número de portas e/ou janelas com ligação ao exterior: _____

Durante a amostragem as portas e/ou janelas estiveram:

	Sempre	Algumas vezes	Raramente
Abertas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entreabertas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fechadas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6. Amostragem

Data de início: _____ **Data Final:** _____

Hora de início: _____ **Hora Final:** _____

Valor registado: _____

ANEXO III

Ficha de levantamento das características do edifício

7. Observações:
