

CATARINA PAULA PACHECO DA SILVA

**ESTUDO DA DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA NO VULCÃO DAS  
FURNAS (ILHA DE S. MIGUEL): O CASO DO  $^{222}\text{Rn}$**



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2006

CATARINA PAULA PACHECO DA SILVA

**ESTUDO DA DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA NO VULCÃO DAS  
FURNAS (ILHA DE S. MIGUEL): O CASO DO <sup>222</sup>Rn**

TESE REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO EM VULCANOLOGIA E RISCOS  
GEOLÓGICOS, DE ACORDO COM O DISPOSTO NO ARTº 14º DO REGULAMENTO  
DO MESTRADO EM VULCANOLOGIA E RISCOS GEOLÓGICOS, PUBLICADO EM  
DIÁRIO DA REPÚBLICA, II SÉRIE, Nº 189, DE 17 DE AGOSTO DE 2000.

ORIENTADORA:

PROFESSORA DOUTORA TERESA DE JESUS LOPES FERREIRA  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

CO-ORIENTADOR:

PROFESSOR DOUTOR JOÃO LUÍS ROQUE BAPTISTA GASPAR  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2006

*Aos meus pais e irmãs*

---

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS .....	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	XII
AGRADECIMENTOS .....	XIII
RESUMO .....	XVII
ABSTRACT .....	XX
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Nota Prévia .....	1
1.2. O Radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	3
1.3. Factores que Influenciam o Comportamento do Radão .....	7
1.3.1. Radão no Solo .....	7
1.3.2. Radão no Ar .....	14
1.3.3. Radão na Água .....	18
1.4. O Radão como Indicador de: .....	21
1.4.1. Presença de Falhas .....	21
1.4.2. Actividade Sísmica .....	22
1.4.3. Erupções Vulcânicas .....	25
1.4.4. Reservatórios Geotérmicos .....	28
1.5. Metodologias de Monitorização do Radão .....	30
1.5.1. Princípios de Detecção .....	30
1.5.2. Método de Amostragem Imediato .....	31
1.5.3. Método de Amostragem Integrado .....	33
1.5.4. Método de Amostragem Contínuo .....	38
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – VULCÃO DAS FURNAS .....	41
2.1. Nota Prévia .....	41
2.2. Localização Geográfica .....	42
2.3. Enquadramento Geológico .....	44
2.3.1. Geomorfologia .....	44

---

2.3.2. Tectónica .....	46
2.3.3. Vulcanoestratigrafia .....	47
2.4. Erupções e Sismicidade Históricas.....	50
2.4.1. Erupções Históricas .....	50
2.4.2. Sismicidade Histórica .....	52
2.5. Zonas de Desgaseificação.....	57
3. CARTOGRAFIA DE RADÃO NO SOLO.....	59
3.1. Nota Prévia .....	59
3.2. Metodologia.....	60
3.2.1. Equipamento.....	60
3.2.1.1. Detector de <sup>222</sup> Rn .....	60
3.2.1.2. Outros Materiais Utilizados .....	63
3.2.2. Amostragem.....	64
3.2.3. Parâmetros Meteorológicos.....	68
3.2.4. Recolha e Tratamento de Dados.....	69
3.3. Apresentação dos Resultados .....	70
3.4. Discussão.....	71
3.4.1. Campanhas Realizadas.....	71
3.4.2. Distribuição Espacial da Concentração de <sup>222</sup> Rn e da Temperatura no Solo .....	78
3.4.3. Análise dos Resultados .....	95
4. MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO .....	101
4.1. Nota Prévia .....	101
4.2. Metodologia.....	102
4.2.1. Equipamento.....	102
4.2.2. Amostragem.....	103
4.2.3. Recolha e Tratamento de Dados.....	105
4.3. Apresentação dos Resultados .....	106
4.4. Discussão.....	108
5. SAÚDE PÚBLICA .....	115
5.1. Nota Prévia .....	115
5.2. Radão e Saúde .....	117
5.3. Radão no Interior de Habitações .....	121

---

5.4. Monitorização Contínua de Radão no Interior de uma Habitação na Freguesia das Furnas.....	124
5.4.1. Metodologia .....	124
5.4.1.1. Equipamento .....	124
5.4.1.2. Amostragem .....	125
5.4.1.3. Parâmetros Meteorológicos .....	127
5.4.1.4. Recolha e Tratamento de Dados .....	127
5.4.2. Apresentação dos Resultados.....	128
5.4.3. Discussão dos Resultados .....	132
5.4.4. Mitigação do Risco.....	143
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	145
BIBLIOGRAFIA.....	154

# ÍNDICE DE FIGURAS


## Figura 1.1

Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . Legenda: R – radiação (emissões  $\alpha$  e  $\beta$ ) (modificado de Hasbrouck, 1983 e de Spencer, 1992). ..... 4


## Figura 1.2

Representação esquemática da migração, por advecção, do geogás em fracturas sem água e preenchidas por água (modificado de Etiope e Martinelli, 2002). ..... 13

## Figura 2.1

Arquipélago dos Açores. Legenda:  - Localização da ilha de S. Miguel. .... 42

## Figura 2.2

Modelo digital de terreno da ilha de S. Miguel, obtido a partir de dados do Instituto Geográfico do Exército. Sistema de referência UTM; Zona 26S. Legenda:  - Vulcão das Furnas. .... 43



## Figura 2.3

Mapa Morfoestrutural do maciço das Furnas (adaptado de Gaspar *et al.*, 1995). .... 46

## Figura 2.4

Estratigrafia do Vulcão das Furnas (adaptado de Guest *et al.*, 1999). ..... 48


## Figura 2.5

Centros eruptivos do vulcanismo histórico do Vulcão das Furnas. Legenda:  erupção de 1439- 1443 e  erupção de 1630 (adaptado de Silveira, 2002). ..... 50

## Figura 2.6

Carta de sismicidade dos Açores (SIVISA, 2003). ..... 52

## Figura 2.7

Cartas de isossistas dos sismos de: a) 22 de Outubro de 1522 b) 26 de Julho de 1591 c) 16 de Abril de 1852 d) 5 de Agosto de 1932 e) 27 de Abril de 1935 f) 26 de Junho de 1952 (intensidades EMS-98). Legenda:  - Localização aproximada dos epicentros (adaptado de Silveira, 2002). ..... 55

## Figura 3.1

Espectro de energias alfa (adaptado de Durridge Company, 2000). ..... 62

## Figura 3.2

Localização dos pontos de amostragem na área cartografada. .... 67

## Figura 3.3

Projectão dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo no período de amostragem. .... 72

## Figura 3.4

Projectão dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da pressão barométrica no período de amostragem. .... 72

<b>Figura 3.5</b>	
Projectão dos valores de concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e da pluviosidade no período de amostragem. ....	73
<b>Figura 3.6</b>	
Varição da humidade no solo e da pluviosidade ao longo do período de amostragem. ....	74
<b>Figura 3.7</b>	
Projectão dos valores de concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e da humidade no solo no período de amostragem. ....	74
<b>Figura 3.8</b>	
Projectão dos valores de concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e da velocidade do vento no período de amostragem. ....	75
<b>Figura 3.9</b>	
Projectão dos valores de concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e da humidade relativa do ar no período de amostragem. ...	75
<b>Figura 3.10</b>	
Projectão da concentração de $^{222}\text{Rn}$ e da temperatura do solo nos pontos amostrados. ....	76
<b>Figura 3.11</b>	
Projectão dos valores da temperatura no solo nos pontos amostrados e da temperatura no solo medida pelo sensor adicional da estação fixa de fluxo de $\text{CO}_2$ (GFUR1) no período de amostragem. ....	77
<b>Figura 3.12</b>	
Valores da temperatura do ar do sensor da estação fixa de $\text{CO}_2$ ao longo do tempo. ....	77
<b>Figura 3.13</b>	
a) Histograma dos dados da concentração de radão b) Histograma dos dados da concentração de radão convertidos numa escala logarítmica. ....	81
<b>Figura 3.14</b>	
Gráfico de frequências acumuladas da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo. ....	82
<b>Figura 3.15</b>	
Distribuição espacial da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo. ....	83
<b>Figura 3.16</b>	
Distribuição espacial da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo. Localização das zonas anómalas. ....	85
<b>Figura 3.17</b>	
Distribuição da concentração de $\text{CO}_2$ no solo ( <i>in</i> Sousa, 2003). ....	87
<b>Figura 3.18</b>	
Distribuição espacial da temperatura no solo. ....	91
<b>Figura 3.19</b>	
Distribuição espacial da temperatura do solo. Localização das zonas anómalas. ....	92
<b>Figura 3.20</b>	
Distribuição da anomalia térmica (adaptado de Sousa, 2003). ....	94

<b>Figura 3.21</b>	
Alinhamentos traçados pelas anomalias de $^{222}\text{Rn}$ presentes na área amostrada. ....	97
<b>Figura 3.22</b>	
Alinhamentos definidos pelas anomalias de $\text{CO}_2$ (in Sousa 2003). ....	98
<b>Figura 3.23</b>	
Alinhamentos traçados de acordo com as anomalias de $^{222}\text{Rn}$ sobrepostos no modelo digital de terreno da área amostrada. ....	99
<b>Figura 3.24</b>	
Sobreposição de falhas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995) e alinhamentos traçados neste trabalho no modelo digital de terreno. Legenda: — Falhas definidas por Gaspar <i>et al.</i> (1995); — Alinhamentos traçados; — Limite da área de estudo. ....	99
<b>Figura 3.25</b>	
Modelo final da anomalia local de <i>Bouguer</i> (in Montesinos <i>et al.</i> , 1999). As linhas a tracejado representam os alinhamentos das áreas de baixa densidade. ....	100
<b>Figura 4.1</b>	
Localização da estação de $^{222}\text{Rn}$ instalada temporariamente no jardim do Centro Termal da Furnas. Legenda: ● Local de instalação. ....	103
<b>Figura 4.2</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e a humidade no interior do detector. ....	107
<b>Figura 4.3</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ e o fluxo de $\text{CO}_2$ no solo. ....	109
<b>Figura 4.4</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e a pressão barométrica. ....	109
<b>Figura 4.5</b>	
Relação entre a variação temporal da pluviosidade e da humidade no solo. ....	110
<b>Figura 4.6</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e a pluviosidade. ....	111
<b>Figura 4.7</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ e a humidade no solo. ....	111
<b>Figura 4.8</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e a velocidade do vento. ....	112
<b>Figura 4.9</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo e a humidade relativa do ar. ....	112
<b>Figura 4.10</b>	
Relação entre a variação temporal da concentração de $^{222}\text{Rn}$ e a temperatura do solo. ....	113

**Figura 4.11**

Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e a temperatura do ar..... 113

**Figura 5.1**

Variação temporal dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro. .... 129

**Figura 5.2**

Variação temporal dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação da escala. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro. .... 129

**Figura 5.3**

Variação temporal dos valores de concentração de  $\text{CO}_2$  na habitação. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro. .... 130

**Figura 5.4**

Variação temporal dos valores de concentração de  $\text{CO}_2$  na habitação, com ampliação da escala. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro. .... 130

**Figura 5.5**

Relação entre a variação temporal da humidade no interior do detector e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação..... 131

**Figura 5.6**

Relação entre a variação temporal da concentração de  $\text{CO}_2$  e de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação. As zonas a sombreado correspondem a períodos onde a ventilação foi reduzida ou mesmo nula..... 133

**Figura 5.7**

Relação entre a variação temporal da concentração de  $\text{CO}_2$  e de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação das escalas. As zonas a sombreado correspondem a períodos onde a ventilação foi reduzida ou mesmo nula. .... 133

**Figura 5.8**

Relação entre a variação temporal do fluxo de  $\text{CO}_2$  no solo na estação GFUR1 e a concentração deste gás no interior da habitação, com ampliação da escala. .... 134

**Figura 5.9**

Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo na estação GFUR1 e no interior da habitação, com ampliação da escala..... 135

**Figura 5.10**

Relação entre a variação temporal da pressão barométrica no interior e no exterior da habitação..... 136

**Figura 5.11**

Relação entre a variação temporal da pressão barométrica no interior e exterior da habitação e da concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , com ampliação da escala. .... 136

**Figura 5.12**

Relação entre a variação temporal da temperatura no ar no exterior e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior da habitação, com ampliação da escala..... 137

**Figura 5.13**

Relação entre a variação temporal da temperatura no solo e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior da habitação, com ampliação da escala. .... 137

**Figura 5.14**

Relação entre a variação temporal da humidade relativa do ar no exterior e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior da habitação, com ampliação da escala..... 138

**Figura 5.15**

Relação entre a variação temporal da pluviosidade e da humidade no solo com a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação da escala..... 139

**Figura 5.16**

Relação entre a variação temporal da velocidade do vento e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação da escala..... 139

## ÍNDICE DE TABELAS

### Tabela 1.1

Tempo de semi-vida do primeiro elemento das séries radioactivas, do potássio ( $^{40}\text{K}$ ) e dos isótopos de radão (modificado de Garzón e Garzón, 2001)..... 4

### Tabela 1.2

Tempo de semi-vida, energia libertada pelo decaimento de partículas  $\alpha$  e energia máxima libertada pelo decaimento de partículas  $\beta$  ao longo da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (modificado de Spencer, 1992)..... 5

### Tabela 1.3

Concentração de  $^{238}\text{U}$  em rochas magmáticas (modificado de Wiegand, 2001). ..... 8

### Tabela 1.4

Classificação das águas de acordo com o seu conteúdo em radão (Voronov, 2004)..... 19

### Tabela 3.1

Valor máximo, mínimo e médio da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e da temperatura do solo na área amostrada. .... 70

### Tabela 3.2

Valores máximos e mínimos de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo obtidos em diversas regiões vulcânicas..... 79

### Tabela 3.3

Designação das zonas de concentração anómala de  $^{222}\text{Rn}$ . ..... 84

### Tabela 3.4

Zonas de degaseificação anómalas comuns ao  $^{222}\text{Rn}$  e ao  $\text{CO}_2$ . ..... 88

### Tabela 3.5

Designação das zonas de anomalia térmica. .... 90

### Tabela 3.6

Anomalias térmicas definidas neste trabalho comuns às definidas por Sousa (2003). ..... 93

### Tabela 4.1

Valor máximo, mínimo e médio da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na estação permanente..... 106

### Tabela 5.1

Limites recomendados para a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior de habitações ( $\text{Bq/m}^3$ ). ..... 123

### Tabela 5.2

Valores máximo, mínimo e médio da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e de  $\text{CO}_2$  com base na totalidade dos dados monitorizados (1) e excluindo os dados relativos ao teste efectuado (2). ..... 128

**Tabela 5.3**

Frequências relativas obtidas para determinados intervalos de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  excluindo os dados relativos ao teste realizado..... 141

**Tabela 5.4**

Efeitos e limites de exposição médios para o  $\text{CO}_2$  considerando adultos saudáveis (adaptado de Viveiros, 2003). ... 142

---

## ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

<b>Fotografia 2.1</b>	
Campo fumarólico da Freguesia das Furnas.....	58
<b>Fotografia 3.1</b>	
Equipamento de medição da concentração de $^{222}\text{Rn}$ , marca DurrIDGE RAD7, modelo 711 e versão 2,5. ....	61
<b>Fotografia 3.2</b>	
Montagem do equipamento. Legenda: A - tubos de silicone; B – unidade dessecante; C – filtros.....	64
<b>Fotografia 3.3</b>	
Medição da concentração de $^{222}\text{Rn}$ no solo. Legenda: A - sonda de ferro; B – tubos de silicone; C – RAD7.....	65
<b>Fotografia 3.4</b>	
Estação de Fluxo de $\text{CO}_2$ no solo (GFUR1) com sensores meteorológicos acoplados. ....	68
<b>Fotografia 3.5</b>	
Local de amostragem de maior concentração de $^{222}\text{Rn}$ . Zona de anomalia R2, anomalia dos Tambores, junto ao sopé do Pico das Caldeiras. ....	86
<b>Fotografia 4.1</b>	
O RAD7 e a unidade dessecante foram colocados na casa de protecção da estação de fluxo (GFUR1).....	104
<b>Fotografia 5.1</b>	
Instalação dos detectores de $^{222}\text{Rn}$ e de $\text{CO}_2$ na habitação. ....	125
<b>Fotografia 5.2</b>	
Cave da habitação. Quatro das janelas que facilitam a ventilação deste espaço. ....	126

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**CEC** – Commission of European Communities.

**ECA** – European Collaborative Action.

**EPA** – United States Environmental Protection Agency.

**ICRP** – International Commission on Radiological Protection.

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

**WHO** – World Health Organisation.

## AGRADECIMENTOS

A realização do presente trabalho só foi possível graças ao contributo de diversas personalidades e entidades, pelo que, gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a sua execução, nomeadamente:

- ao Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor Avelino Meneses, pela autorização da realização do mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos;
- à anterior Directora de Departamento, Professora Doutora Teresa Ferreira, e ao actual Director, Professor Doutor José Pacheco, pelas facilidades concedidas na realização deste trabalho;
- à Directora do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Professora Doutora Gabriela Queiroz, pelo apoio concedido que facilitou a realização deste trabalho;
- à minha orientadora, Professora Doutora Teresa Ferreira, pela disponibilidade, discussão, sugestões e partilha de conhecimentos que permitiram o enriquecimento deste trabalho;

- ao meu co-orientador, Professor Doutor João Luís Gaspar; pelas sugestões e partilha de conhecimentos.
- a todos os docentes do curso de mestrado pela partilha de conhecimentos, incentivo e amizade demonstrada;
- aos meus colegas e amigos de mestrado, Andrea Costa, Filomena Rebelo, Goretti Lameiras e Pedro Freire, por todo os momentos de trabalho, partilha de conhecimento e experiências, mas sobretudo pelo seu carinho, amizade e incentivo;
- ao meu colega e amigo, Márcio Marcos, pela discussão de ideias, pelas sugestões apresentadas e pela partilha de documentação. Agradeço sobretudo a sua amizade;
- à minha colega e amiga do grupo de Geoquímica de Gases, Fátima Viveiros, pela forma como me recebeu no grupo. Agradeço a sua sempre pronta disponibilidade na discussão de ideias, as sugestões apresentadas e a partilha de documentação. Agradeço sobretudo a sua amizade e o encorajamento constante;
- à colega e amiga Ana Gomes pelas sugestões apresentadas e pela sua amizade e incentivo;
- a todos os colegas do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos que colaboraram na realização deste trabalho e em especial à Catarina Goulart pelo apoio com o SIG.

- a todos os funcionários do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho e em especial à Patrícia Raposo e à Sílvia Botelho pelo auxílio na execução dos aspectos burocráticos, ao Rui Mestre pela sua colaboração na realização do trabalho de campo e ao José Medeiros pela apoio com o SIG;
- aos responsáveis pela empresa Fundo de Maneio, Lda as horas dispensadas que permitiram a assistência às aulas de mestrado e aos meus antigos colegas;
- a toda a população da Freguesia das Furnas, e em especial aos funcionários do Restaurante Tony`s e à gerente da Residencial Vista do Vale, pela forma como me receberam;
- aos responsáveis pelo Centro Termal das Furnas que permitiram a instalação da estação de radão no jardim e cederam a electricidade;
- aos donos da habitação onde foi colocada a estação de radão e o detector de CO<sub>2</sub> pela sua sempre pronta colaboração;
- a todos os meus amigos pelo incentivo e amizade e em especial à Maria Luísa Pimentel, à Lília Oliveira e à Helena Marques.

- a toda a minha família e, muito em especial, aos meus pais e às minhas irmãs por todo o amor, carinho e encorajamento não só na realização deste trabalho, mas ao longo de toda a minha vida.

## RESUMO

O radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás nobre, radioactivo, incolor e inodoro resultante da série de decaimento do urânio ( $^{238}\text{U}$ ). A sua concentração no solo depende de factores inerentes ao próprio solo, de factores climáticos e das condições de transporte deste gás. Pode ainda ser encontrado dissolvido na água ou disperso no ar atmosférico. Sendo um importante indicador de fenómenos que ocorrem em profundidade o seu estudo tem diversas aplicações, nomeadamente: (a) na identificação de falhas activas; (b) na monitorização sismovulcânica e (c) na prospecção geotérmica.

A área de estudo do presente trabalho centra-se no Vulcão das Furnas, um dos três vulcões centrais da ilha de S. Miguel. Este vulcão é conhecido pela sua significativa desgaseificação, nomeadamente pela presença de campos fumarólicos e de nascentes de água termal e gaseificada. O presente trabalho enquadra-se no âmbito do estudo de desgaseificação difusa através dos solos na freguesia das Furnas, localidade situada na caldeira deste vulcão, apresentando-se a cartografia de  $^{222}\text{Rn}$  e de anomalias térmicas e os resultados dos ensaios de monitorização contínua de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da qualidade do ar interior de uma habitação.

Os trabalhos relacionados com a amostragem da concentração de radão e da temperatura para a realização dos estudos de cartografia, decorreram num período compreendido entre Julho e Novembro de 2005. Os valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  oscilaram entre os 45,9 e os 110808 Bq/m<sup>3</sup>, e a sua distribuição espacial permitiu

identificar 14 zonas anómalas. Tendo por base a localização das áreas anómalas foram definidos alguns alinhamentos de direcção E-W, NE-SW e E-W a WNW-ESE. No que se refere aos valores de temperatura obtidos, estes variaram entre os 16,5 e os 100 °C e foram definidas 3 zonas anómalas principais.

A estação fixa de  $^{222}\text{Rn}$  foi instalada no jardim do Centro Termal, junto à estação permanente de fluxo de  $\text{CO}_2$  (GFUR1). A amostragem contínua de radão no solo foi efectuada entre Agosto e Dezembro de 2005 e os valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  oscilaram entre os 0 e os 35308,28  $\text{Bq/m}^3$ . Uma vez que a concentração de gás no solo pode ser influenciada por factores meteorológicos, recorreu-se aos dados fornecidos pela estação meteorológica acoplada à estação GFUR1. A análise comparativa da distribuição temporal da concentração de radão no solo e dos factores meteorológicos permitiu verificar que a pressão barométrica, a pluviosidade e a humidade no solo parecem ser os factores que exercem maior influência sobre a concentração deste gás no local monitorizado.

O radão quando disperso no ar atmosférico não representa perigo em termos de saúde pública, no entanto, quando se acumula em espaços interiores, como em habitações, pode representar uma séria ameaça. A amostragem contínua de radão e de dióxido de carbono no interior de uma habitação da freguesia das Furnas decorreu num período compreendido entre Novembro e Dezembro de 2005. Os valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  oscilaram entre os 0 e os 13272,91  $\text{Bq/m}^3$  e os de dióxido de carbono entre os 0 e os 6 %vol. Os valores mais elevados foram obtidos em condições de ventilação nula ou reduzida sendo os valores de radão nestes casos superiores aos

400 Bq/m<sup>3</sup> estabelecidos na legislação nacional como limite aceitável para a concentração de radão no interior de habitações em regiões graníticas. Também o CO<sub>2</sub>, em condições de ventilação nula, atinge valores acima dos aconselhados pelas Organizações Internacionais para ambientes fechados. O factor que parece exercer maior influência sobre a concentração de radão no interior da habitação é a ventilação, dependendo esta, por sua vez, dos hábitos dos residentes e da velocidade do vento.

Deste trabalho ressalta o facto da desgaseificação difusa de radão através dos solos apresentar uma distribuição espacial semelhante à cartografada para o CO<sub>2</sub>, denotando a importância que a presença do reservatório hidrotermal tem neste processo de desgaseificação. Adicionalmente, este trabalho evidencia a possibilidade deste gás estar presente no interior de habitações, em concentrações muito superiores às recomendadas pelas entidades portuguesas regulamentadoras da qualidade de ar interior, e como tal, constituir um factor de risco para a saúde pública. Assim, torna-se necessário, no futuro, continuar a desenvolver trabalhos, neste vulcão, quer no âmbito da monitorização sismovulcânica, quer no que diz respeito à caracterização da qualidade do ar no interior de um maior número de habitações, no sentido de melhor avaliar a extensão dos potenciais efeitos em termos de saúde pública.

## ABSTRACT

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) is a radioactive, colourless and odourless noble gas that results from the radioactive decay chain of uranium ( $^{238}\text{U}$ ). The concentration of radon in the soil depends on several factors such as meteorological variations, transport conditions and soil characteristics. This gas can be found dissolved in water or in the atmospheric air. Radon is an important indicator of deep events and its study can be used, mainly, in the: (a) identification of active faults; (b) seismovolcanic monitoring and (c) geothermal prospection.

The studied area is located in Furnas Volcano, one of the three central volcanoes of S. Miguel Island. This volcano is known for its remarkable degassing areas. Fumarolic grounds, thermal springs and  $\text{CO}_2$  rich mineral cold waters are some of the secondary volcanic phenomena that can be seen at the surface. This work pretends to be a contribution to the study of soil diffuse degassing at Furnas Village, a small parish located inside Furnas Volcano caldera, and presents the spatial distribution of  $^{222}\text{Rn}$  and temperature anomalies. Additionally, it includes the results of the continuous monitoring of radon soil degassing and of indoor air quality.

The data acquisition to elaborate the spatial distributions of radon concentration and temperature took place between July and November 2005. The measured values indicate that  $^{222}\text{Rn}$  concentration varies between 45,9 and 110808  $\text{Bq/m}^3$  and 14 anomalous zones were identified. The location of these anomalous zones allowed to

define some alignments with direction E-W, NE-SW and E-W to WNW-ESE. In what concerns the soil temperature, the measured values oscillated between 16,5 and 100 °C. In this case 3 main anomalous zones were identified.

A continuous  $^{222}\text{Rn}$  station was installed inside Furnas Volcano caldera, in the garden of the Furnas Thermal Center, near to the  $\text{CO}_2$  soil flux permanent station (GFUR1). The continuous monitoring of radon soil degassing was performed between August and December 2005 and the  $^{222}\text{Rn}$  concentration values oscillated between 0 and 35308,28  $\text{Bq/m}^3$ . Since the gas concentration in the ground can be influenced by meteorological factors, the data from the meteorological station coupled to GFUR1 station was used in order to understand those influences. The comparative analysis of the temporal distribution of radon concentration in the ground and the meteorological factors, allowed to verify that the radon concentration, in the sampling point, seems to be influenced, mainly, by the barometric pressure, the rainfall and the soil humidity.

Radon when dispersed in atmospheric air does not seem to represent danger for the health, however, when it accumulates in confined spaces, as in dwellings, it can represent a serious threat. The continuous monitoring of indoor radon and carbon dioxide, in a dwelling of Furnas village, took place between November and December 2005. Radon concentration values oscillated between 0 and 13272,91  $\text{Bq/m}^3$  and carbon dioxide concentration values varied between 0 and 6 %vol. The highest values were obtained when the ventilation efficiency was reduced or null being the  $^{222}\text{Rn}$  values, on those periods, significantly higher than the 400  $\text{Bq/m}^3$  recommended by the portuguese law. In these conditions also the concentration of carbon dioxide reached

values above the recommended ones by the International Organizations for indoor environments. In this study indoor radon concentration seems to be essentially depending, on ventilation. The ventilation efficiency is controlled by the residents habits and the wind speed.

This work stands out the fact that diffuse radon degassing exhibits a spatial distribution similar to the one of diffuse CO<sub>2</sub> soil concentration, showing up the importance that the hydrothermal system has on this degassing process. Additionally, this work calls the attention to the fact that indoor radon can reach concentrations clearly above the recommended threshold values established by the indoor air quality regulation and, consequently, may become a risk to the public health. Future works should be conducted on this volcano for seismovolcanic monitoring purposes and to the indoor air quality survey, covering a higher number of dwellings aiming to better assess the potential risk on public health.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Nota Prévia

Os materiais geológicos contêm pequenas quantidades de elementos químicos capazes de emitirem radioatividade natural. Um dos elementos que mais contribui para a emissão de partículas radioactivas é o radão. Cerca de 50% do total da radiação natural a que a população mundial está sujeita é proveniente da radioactividade emitida por este gás (Manikandan *et al.*, 2002). Na natureza existem 32 isótopos deste elemento radioactivo (Wiegand, 2001). Os mais importantes são: o actínio ( $^{219}\text{Rn}$ ), o torão ( $^{220}\text{Rn}$ ) e o radão ( $^{222}\text{Rn}$ ). No contexto deste trabalho, qualquer referência genérica ao elemento radioactivo radão corresponde ao isótopo  $^{222}\text{Rn}$ .

O radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás nobre, incolor e inodoro resultante da série de decaimento do urânio ( $^{238}\text{U}$ ) (Hasbrouck, 1983). Este gás foi descoberto em 1898 por Fredrich Ernst Dorn e tal como acontece com outros gases nobres, o radão, apesar de estar presente em quantidades vestigiais nas rochas ígneas e nas emanações vulcânicas, pode ser um importante indicador de fenómenos que ocorrem em profundidade (Allard, 1983).

Segundo alguns autores (e.g. Garcia-Vindas e Monnin, 2005), o estudo das emanações de radão em sistemas vulcânicos possibilita prever a ocorrência de sismos e de erupções vulcânicas e determinar a localização de falhas activas e de

sistemas geotérmicos. Thomas (1989) sugere que a determinação da concentração de radão e dos produtos resultantes do seu decaimento na atmosfera, possibilitam estimar o volume de magma existente em câmaras magmáticas de vulcões em actividade eruptiva.

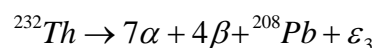
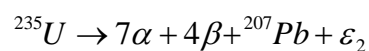
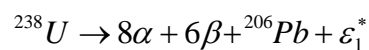
Existem diversas técnicas que podem ser aplicadas na medição da concentração deste gás dependendo dos objectivos, do tipo de medição (isótopo que se pretende medir), da sensibilidade pretendida e dos recursos humanos e financeiros disponíveis.

Nas últimas décadas o crescente interesse pela monitorização do radão, quer no que diz respeito à investigação científica (predição sísmica e vulcânica), quer a aspectos relacionados com a saúde pública (radiação em espaços interiores), tem sido um forte incentivo ao aumento do design e da produção/construção de detectores de radão, não obstante também ao seu encarecimento (Galli *et al.*, 2000).

Neste capítulo pretende-se fazer uma abordagem geral ao radão ( $^{222}\text{Rn}$ ), enquanto elemento químico radioactivo, assim como aos fenómenos que podem influenciar o seu comportamento à superfície. Saliencia-se também a importância deste isótopo como precursor de actividade sismovulcânica e por fim, referem-se alguns dos princípios de detecção e métodos de amostragem.

## 1.2. O Radão ( $^{222}\text{Rn}$ )

Os principais elementos radioactivos presentes na crosta terrestre são o  $^{238}\text{U}$ , o  $^{235}\text{U}$ , o  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{40}\text{K}$ . Estes elementos provêm da nébula solar que originou a Terra e distribuíram-se preferencialmente no manto e crosta terrestre. O  $^{238}\text{U}$ , o  $^{235}\text{U}$  e o  $^{232}\text{Th}$ , por decaimento, dão origem a três séries radioactivas que se podem representar do seguinte modo (Garzón e Garzón, 2001):



\*  $\varepsilon_i (i = 1,2,3) \rightarrow$  energia de reacção.

Estes elementos radioactivos são uma fonte contínua de produção de partículas  $\alpha$  e  $\beta$ , fotões e de produtos do seu decaimento radioactivo (Garzón e Garzón, 2001). De entre os vários produtos de decaimento destas séries o mais relevante no contexto deste trabalho é o  $^{222}\text{Rn}$ , uma vez que (a) é um importante indicador de fenómenos que ocorrem em profundidade, (b) os métodos para a sua detecção são práticos e económicos (c) apresenta um tempo de semi-vida muito superior aos seus isótopos ( $^{220}\text{Rn}$  e  $^{219}\text{Rn}$ ) o que facilita a sua detecção (tabela 1.1) e (d) o  $^{238}\text{U}$  é muito mais abundante na natureza relativamente aos seus isótopos.

Tabela 1.1 – Tempo de semi-vida do primeiro elemento das séries radioactivas, do potássio ( $^{40}\text{K}$ ) e dos isótopos de radão (modificado de Garzón e Garzón, 2001).

Radionuclídeos	Semi-vida (anos)	Isótopos do Rn	Semi-vida
$^{238}\text{U}$	$4,46838 \times 10^9$	$^{222}\text{Rn}$ (Radão)	3,82 dias
$^{235}\text{U}$	$0,70385 \times 10^9$	$^{219}\text{Rn}$ (Actinão)	3,90 segundos
$^{232}\text{Th}$	$14,0500 \times 10^9$	$^{220}\text{Rn}$ (Torão)	59,50 segundos
$^{40}\text{K}$	$1,27778 \times 10^9$	-	-

Na figura 1.1 ilustra-se toda a série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , com a localização do  $^{222}\text{Rn}$  relativamente ao seu isótopo progenitor e a toda a sequência de decaimento.

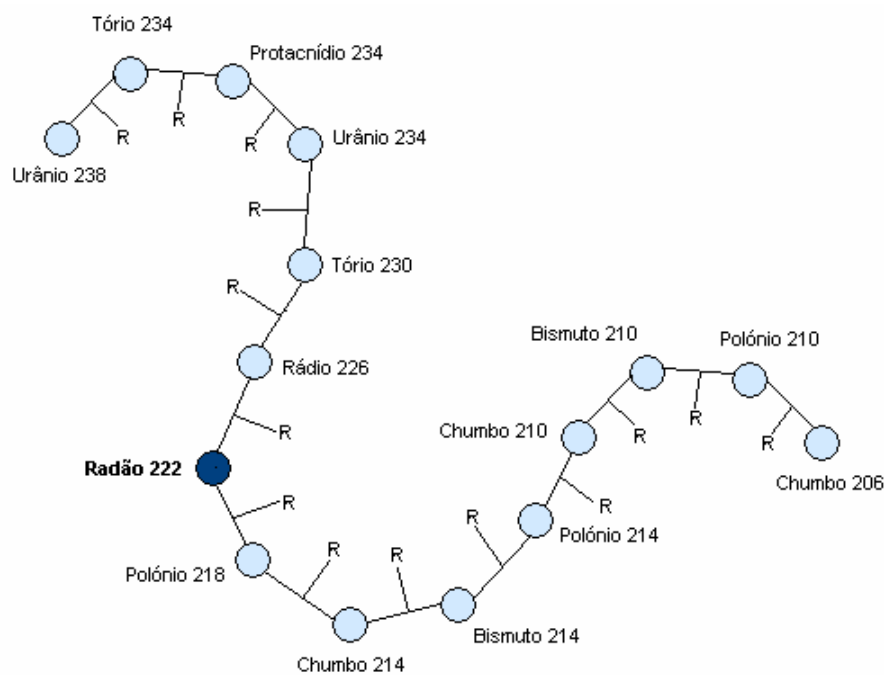


Figura 1.1 – Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . Legenda: R – radiação (emissões  $\alpha$  e  $\beta$ ) (modificado de Hasbrouck, 1983 e de Spencer, 1992).

O radão tem um tempo de semi-vida de apenas 3,82 dias. É directamente produzido pelo  $^{226}\text{Ra}$ , decai emitindo do seu núcleo uma partícula  $\alpha$  transformando-se

no elemento seguinte da cadeia, o  $^{218}\text{Po}$ . A sequência de decaimento termina com uma forma estável de chumbo (tabela 1.2) (Hasbrouck, 1983).

Tabela 1.2 – Tempo de semi-vida, energia libertada pelo decaimento de partículas  $\alpha$  e energia máxima libertada pelo decaimento de partículas  $\beta$  ao longo da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (modificado de Spencer, 1992).

Radionuclídeos	Semi-vida	Energia $\alpha$ (MeV*)	Energia Máxima $\beta$ (MeV)
Urânio ( $^{238}\text{U}$ )	4,5 bilhões de anos	4,1 – 4,2	-
Tório ( $^{234}\text{Th}$ )	24 dias	-	0,06 – 0,2
Protactínio ( $^{234}\text{Pa}$ )	1,2 minutos	-	2,3
Urânio ( $^{234}\text{U}$ )	250 000 anos	4,7 – 4,8	-
Tório ( $^{230}\text{Th}$ )	80 000 anos	4,6 – 4,7	-
Rádio ( $^{226}\text{Ra}$ )	1 600 anos	4,6 – 4,8	-
Radão ( $^{222}\text{Rn}$ )	3,82 dias	5,5	-
Polónio ( $^{218}\text{Po}$ )	3,05 minutos	6,0	-
Chumbo ( $^{214}\text{Pb}$ )	26,8 minutos	-	0,7 – 1,0
Bismuto ( $^{214}\text{Bi}$ )	19,7 minutos	-	0,4 – 3,3
Polónio ( $^{214}\text{Po}$ )	16 milésimas de segundo	7,7	-
Chumbo ( $^{210}\text{Pb}$ )	22 anos	-	< 0,1
Bismuto ( $^{210}\text{Bi}$ )	5 dias	-	1,2
Polónio ( $^{210}\text{Po}$ )	138 dias	5,3	-
Chumbo ( $^{206}\text{Pb}$ )	Estável	-	-

\*MeV = milhões de electrões volts.

A radioactividade emitida é medida em picocuries por litro (pCi/L) e corresponde ao número de desintegrações que ocorrem em determinado período de tempo por litro de ar ou, no Sistema Internacional, em becquerel por metro cúbico ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) em que 1 Bq corresponde à desintegração de um átomo de radão por segundo por metro cúbico de ar. 1 pCi/L equivale a  $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$ .

No processo de decaimento do rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ) para radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) é libertada uma partícula  $\alpha$  altamente energética (Spencer, 1992). Essa partícula é composta por dois neutrões e dois prótons pelo que apresenta uma carga +2 (equivalente a um núcleo de He) e tem energia cinética suficiente para com o seu deslocamento fazer recuar o átomo de radão recém-formado ( $\alpha$ -recoil) (Spencer, 1992). Neste decaimento é libertada uma energia de aproximadamente 4 Mev, da qual apenas 86,24 kev correspondem à energia de recuo do radão sendo a restante transferida para a partícula  $\alpha$  (Sun e Furbish, 1995). Aquando do seu recuo, se o radão estiver perto da superfície do grão mineral, pode ser libertado por este efeito. Se por outro lado, o radão ficar retido na estrutura molecular do mineral, pode mais tarde ser libertado por um processo gradual de migração conhecido por difusão (Spencer, 1992). A distância percorrida pelo átomo de radão aquando da libertação da partícula  $\alpha$  depende do meio onde o átomo se encontra e para onde se desloca. Deste modo, segundo diversos autores (Semkow, 1990; Greeman e Rose, 1996), a distância média associada ao efeito de recuo é (a) 30-50 nm em material sólido, (b) 95 nm na água e (c) 64000 nm no ar.

Sendo um gás inerte, o radão ao contrário dos restantes elementos da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , não estabelece ligações químicas o que lhe permite deslocar-se livremente através dos poros do solo e de material geológico permeável (Spencer, 1992).

## **1.3. Factores que Influenciam o Comportamento do Radão**

### **1.3.1. Radão no Solo**

Nem todos os átomos de radão resultantes do decaimento do rádio presente no solo ou nas rochas são libertados e conseguem movimentar-se. Na realidade o átomo de radão recém-formado pode (1) sofrer um deslocamento pequeno e permanecer retido na malha do mineral ou da molécula onde se forma, (2) sofrer deslocamento, atravessar o poro e ser incorporado no grão adjacente ou (3) ser libertado para os poros existentes na rocha ou no solo (Schumann e Gundersen, 1996). À fracção de átomos libertados para os poros da rocha ou do solo dá-se a designação de coeficiente de emanação do radão (Schumann e Gundersen, 1996; Greeman e Rose, 1996).

As características do solo, o tipo de rocha que originou o solo (tabela 1.3) e factores climáticos determinam o coeficiente de emanação do radão, assim como as características de transporte desse gás no solo. Factores como a porosidade, permeabilidade, densidade, tamanho e forma dos grãos, distribuição do rádio no grão mineral (que de acordo com Greeman e Rose (1996) tem tendência para se acumular nas zonas mais superficiais dos grãos facilitando assim a libertação do radão), teor de água no solo, temperatura e variações sazonais influenciam o coeficiente de emanação deste gás (Schumann e Gundersen, 1996).

Tabela 1.3 – Concentração de  $^{238}\text{U}$  em rochas magmáticas (modificado de Wiegand, 2001).

Tipos de Rochas Magmáticas	Concentração de $^{238}\text{U}$ (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

Outros factores externos podem igualmente influenciar a concentração de radão. Wollenberg *et al.* (1985) e Kies *et al.* (1999) salientam a influência que as marés terrestres podem ter na concentração do radão. As marés terrestres conseguem deformar a Terra e provocar alterações de pressão nos poros e no material crostal saturado em fluidos. Também as fases da Lua, o nascer e pôr-do-sol e as marés principalmente em sítios próximos do mar podem, segundo Aumento (2001), influenciar a concentração de radão.

Por outro lado, a circulação de água e de gases naturais ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2$ ) possibilita também o transporte do radão (Kristiansson e Malmqvist 1982 *in* Etiope e Martinelli, 2002). Factores como o vento (direcção e velocidade), variações da pressão atmosférica, percolação de água das chuvas e alteração da temperatura do solo influenciam a movimentação destes gases no solo e conseqüentemente influenciam a libertação de radão à superfície (Coutinho, 2000).

Uma análise extensa da movimentação de radão no solo ou através de fracturas existentes no material rochoso é efectuada por Etiope e Martinelli (2002). Esta movimentação pode ocorrer, de acordo com estes autores, de duas formas distintas:

1 – Por difusão, movimentando-se das zonas de maior concentração para as zonas de menor concentração, em todas as direcções, de forma a que a sua concentração nas rochas ou no solo se distribua uniformemente. Este transporte rege-se pela lei de Fick (equação 1):

$$(1) \quad F = -D_m \frac{dC}{dz}$$

Em que  $F$  corresponde ao fluxo do gás,  $D_m$  corresponde ao coeficiente de difusão molecular ( $m^2/s$ ) e  $dC$  corresponde à variação da concentração do gás ( $kg/m^3$ ) segundo a direcção  $dz$ . O coeficiente de difusão molecular é uma constante específica de cada gás que depende da temperatura, da pressão e do meio (ar ou água). No caso do radão, o coeficiente de difusão molecular no ar é  $0,12 \text{ cm}^2/s$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e na água é  $1,37 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/s$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). O coeficiente de difusão molecular não tem em conta a interacção com os poros, é necessário, neste caso, calcular o coeficiente de difusão molecular efectivo ( $De$ ) de acordo com a equação (2) que se segue:

$$(2) \quad De = D_m n$$

Em que  $D_m$  corresponde ao coeficiente de difusão molecular ( $m^2/s$ ) e  $n$  diz respeito à porosidade efectiva do meio (%).

2 – Por advecção, ou seja, através de gradientes de pressão, em que a movimentação se processa das zonas de maior pressão para as zonas de menor pressão. No caso específico em que o movimento advectivo é provocado por um gradiente geotérmico, então este tipo de transporte assume a designação de convecção. O fluxo do gás ( $F$ ), neste caso, pode ser descrito do seguinte modo (equação 3):

$$(3) \quad F = Cv$$

Em que  $C$  corresponde à concentração ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $v$  à velocidade do gás ( $\text{m/s}$ ).

A velocidade do gás depende do gradiente de pressão e do coeficiente de mobilidade. O coeficiente de mobilidade, por seu lado, depende de factores como a geometria do meio e a viscosidade do próprio gás. A velocidade rege-se pela lei de Darcy e pode ser traduzida pela equação 4, quando não existe água no sistema, e pela equação 5 em meio aquoso:

$$(4) \quad v = k \frac{\Delta P}{\mu Z}$$

$$(5) \quad v = Ki$$

Na equação 4,  $v$  é a velocidade do gás ( $\text{m/s}$ ),  $k$  corresponde à permeabilidade intrínseca ( $\text{m}^2$ ),  $\mu$  corresponde à viscosidade do gás ( $\text{kg/ms}$ ) e  $\Delta P$  a diferença de pressão ( $\text{kg/ms}^2$ ) entre dois pontos, cuja distância entre eles é igual a  $Z$

(m). Enquanto que na equação 5,  $v$  é a velocidade do gás (m/s),  $K$  corresponde à condutividade hidráulica do meio e  $i$  ao gradiente hidráulico.

No que concerne ao radão, a quantidade deste gás presente na subsuperfície do solo é normalmente demasiado pequena ( $10^{-10}$  ppm) para que possa por si só estabelecer um gradiente de pressão significativo. Assim é preciso ter em linha de conta a existência de outros gases, presentes em maiores quantidades, cujos gradientes de pressão podem contribuir para fazer deslocar o radão. Nestas circunstâncias estes gases funcionam como gases de arraste, sendo os mais comuns o  $\text{CO}_2$ , o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{N}_2$ .

Esses gradientes de pressão podem ser induzidos por factores como tensões tectónicas, variações litostáticas, fracturação de rochas, formação localizada de um gás, recarga e descarga de aquíferos e de outros reservatórios de fluidos em profundidade. Em zonas mais superficiais este processo é influenciado por parâmetros atmosféricos tais como a pressão barométrica, o vento, a temperatura do ar e a pluviosidade.

Apesar destes dois processos de movimentação de gases (difusão e advecção) serem descritos separadamente, na natureza raramente ocorrem isoladamente. Assim, a movimentação de determinado gás, no solo, resulta da sua combinação. Enquanto a difusão assume um papel importante em capilares e rochas com poros pequenos, o gradiente de pressão assume grande relevo em rochas muito

porosas ou em zonas fracturadas. Deste modo, o fluxo total ( $F$ ) de um determinado gás pode ser descrito pela seguinte equação (equação 6):

$$(6) \quad F = -nD_m \frac{dC}{dz} + vC$$

Em que  $nD_m \frac{dC}{dz}$  representa a componente de difusão e  $vC$  a componente de advecção.

O que se verifica é que quando o transporte por advecção está presente, o transporte por difusão pode ser negligenciado. No caso específico do radão há que ter em linha de conta não só as leis que regem os transportes de gases descritos, como também o seu decaimento radioactivo.

Stoker e Kruger (1975 *in* Etiope e Martinelli, 2002) desenvolveram um tratamento matemático que permite calcular a concentração de radão: (1) em sistemas de alta entalpia, (2) em sistemas geotérmicos e (3) na determinação de anomalias de radão resultantes de eventos sísmicos ou vulcânicos.

As características do radão, tais como o curto período de semi-vida e o elevado número de massa (222), não permitem que este gás possa ser transportado a grandes distâncias. Considerando-se que por difusão o seu transporte não deverá ser superior a 10 metros. O facto de ter sido detectado o seu transporte a distâncias muito

superiores (> a 100 metros), na década de 70, levou a que outras questões fossem levantadas tais como qual o processo de transporte associado a este gás.

Surge assim nos anos 80 a teoria do geogás proposta por Kristiansson e Malmqvist (1982 *in* Etiope e Martinelli, 2002). Esta teoria tem por base os princípios que se seguem:

- (a) A ascensão de microfluxo de gases ao longo de falhas e fracturas é um fenómeno muito comum na crosta terrestre;
- (b) O tipo de transporte que rege a ascensão do microfluxo é a advecção e o geogás corresponde a uma mistura de gases naturais;
- (c) A ascensão do geogás ocorre de um modo rápido;
- (d) Quando o geogás encontra um meio aquoso forma um fluxo de microbolhas (Fig. 1.2);
- (e) As microbolhas conseguem transportar elementos traço (gases e partículas sólidas) ao longo de grandes distâncias.



Figura 1.2 – Representação esquemática da migração, por advecção, do geogás em fracturas sem água e preenchidas por água (modificado de Etiope e Martinelli, 2002).

De acordo com esta teoria, o geogás corresponde a uma mistura natural de gases, composta por gases de arraste ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ) que transportam gases raros ( $\text{He}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ). O transporte de radão por fluxo de gases de arraste revela-se o meio de transporte mais rápido. A presença de aquíferos ou de rochas saturadas não representa um obstáculo à migração do radão por este tipo de transporte, uma vez que, no primeiro caso, ocorre a formação de microbolhas que atravessam o aquífero, enquanto que no segundo, à mesma pressão, o gás movimenta-se mais rapidamente em rochas saturadas do que em ambientes secos.

A transferência de átomos de radão do solo para a atmosfera implica três processos diferentes. O primeiro designa-se por emanação e corresponde à libertação do radão da fase sólida do solo (grão mineral ou partículas do solo). O segundo corresponde ao transporte deste gás como resultado de processos de advecção e/ou difusão. Finalmente o último processo envolvido nesta transferência é a exalação e corresponde à passagem do radão do solo para a atmosfera (Wiegand, 2001).

### **1.3.2. Radão no Ar**

A taxa de exalação do radão na superfície terrestre varia de acordo com diversos factores. Piliposian e Appleby (2003) sugerem uma taxa de exalação constante igual a  $1570 \text{ Bq/m}^2\text{ano}$  ( $0,87 \text{ átomos/cm}^2\text{s}$ ) para regiões continentais do hemisfério norte tendo por base dados obtidos através de estudos realizados em várias regiões dos EUA e continente euro-asiático.

Os mesmos autores consideram que se aplicam os princípios da conservação à movimentação horizontal de uma coluna vertical de ar, sobre a superfície terrestre, durante um longo período de tempo. Deste modo, o radão que exala da superfície terrestre é injectado na base da coluna vertical de ar e é transportado verticalmente por difusão turbulenta. Como o radão é um gás inerte só é removido da coluna de ar quando decai transformando-se no elemento seguinte da cadeia de decaimento, polónio ( $^{218}\text{Po}$ ). Não obstante os produtos do seu decaimento poderem aderir a aerossóis, por deposição destes, são facilmente removidos da atmosfera pelo que o seu tempo de permanência é igualmente reduzido, sendo estimado em apenas alguns dias (Winkler, 1997). A concentração de radão na atmosfera pode ser traduzida pela equação (7) que se segue:

$$(7) \quad \frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C_{Rn}}{\partial z} \right) - \lambda_{Rn} C_{Rn}$$

Em que  $C_{Rn}(z, t)$  corresponde à concentração de radão ( $\text{Bq/m}^3$ ) à altitude  $z$  no tempo  $t$ .  $D$  diz respeito à difusão vertical efectiva e  $\lambda_{Rn}$  refere-se à constante de decaimento do radão. Esta equação aplica-se quando a escala temporal é pequena e a advecção vertical tem um papel significativo (Piliposian e Appleby, 2003). Para períodos de tempo longos é necessário ter em conta a difusão turbulenta (equação 8):

$$(8) \quad -D \frac{\partial C_{Rn}}{\partial z} \Big|_{(0,t)} = F, \quad C_{Rn}(z,t) \rightarrow 0 \text{ quando } z \rightarrow \infty,$$

Em que  $F$  corresponde ao fluxo de radão em ( $\text{Bq/m}^2$ ) que passa da superfície terrestre para a base da coluna de ar.

Assim, e de acordo com diversos autores (Carvalho, 1995; Piliposian e Appleby, 2003; Brunke *et al.*, 2004), uma coluna de ar que se desloque muito tempo sobre o oceano ao atingir a linha de costa continental apresentará uma concentração de radão muito baixa, por outro lado, ao atravessar a massa continental a concentração deste gás, na coluna de ar, irá aumentar, face à contribuição da exalação de radão deste ambiente.

Assim, segundo Carvalho (1995) apesar da exalação do radão do solo desempenhar um papel fundamental na origem deste gás na atmosfera, serão os factores meteorológicos como a direcção do vento e a origem das massas de ar que determinam a sua concentração na atmosfera.

A uma escala local, para além dos factores meteorológicos indicados, a temperatura e a humidade desempenham também um papel determinante na concentração do radão no ar atmosférico (García-Talavera *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2005a; Sahota *et al.*, 2005). As temperaturas do ar elevadas estão associadas a correntes convectivas ascendentes o que favorece a exalação e dispersão do radão. Como a dispersão deste gás aumenta, a sua concentração junto da superfície terrestre diminui (García-Talavera *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2005a). Por outro lado, níveis de

humidade elevados inibem a emissão do radão do solo para a atmosfera (García-Talavera *et al.*, 2001). Outros factores como velocidade do vento, precipitação, concentração de aerossóis no ar, variações da pressão atmosférica e características geológicas do local também influenciam a concentração de radão no ar (Inagaki *et al.*, 2005; Zhuo *et al.*, 2005; Sahota *et al.*, 2005; Baciú, 2005).

Pelo exposto, a concentração de radão na atmosfera, em determinado local, sofre variações diárias e sazonais directamente relacionadas com as condições meteorológicas. Estudos desenvolvidos por Baciú (2005), durante um período de 5 anos, mostram que no que concerne à temperatura ambiente, as variações diárias evidenciadas pelos produtos de decaimento do radão na camada limite planetária, indicam concentrações destes produtos, junto ao solo, mais elevadas durante o período nocturno em relação ao diurno. Tal deve-se ao facto de durante a noite a camada limite planetária apresentar uma estratificação estável favorecendo o incremento da concentração destes produtos junto ao solo. Pelo contrário, durante o dia, devido aos gradientes de temperatura que se geram (temperatura do ar atmosférico vs temperatura da superfície terrestre), esta camada da troposfera torna-se instável exibindo turbulência favorecendo a difusão dos produtos de decaimento do radão, conduzindo assim à diminuição da concentração dos mesmos junto à superfície terrestre. Relativamente às variações sazonais a concentração dos produtos de decaimento do radão evidencia valores máximos no Outono e mínimos na Primavera/Verão. Apesar deste estudo se basear na detecção dos produtos de decaimento do radão, permite-nos interpretar, de forma indirecta, o modo como o

radão se distribui na atmosfera em resposta às variações diárias e sazonais da temperatura.

A humidade no ar favorece a adesão dos produtos de decaimento do radão aos aerossóis, contribuindo assim para a sua remoção da atmosfera por deposição (Winkler, 1997; Baciú, 2005).

No que diz respeito à velocidade do vento o que se verifica é que quando esta é elevada a taxa de difusão do radão é também elevada pelo que a concentração desse gás junto do solo baixa. Inversamente, quando a velocidade do vento diminui aumenta a concentração de radão junto do solo (Baciú, 2005).

A pressão atmosférica afecta também a concentração de radão no ar ao provocar alterações no coeficiente de exalação do radão no solo. Deste modo, um incremento da pressão atmosférica conduzirá a uma diminuição da exalação do radão no solo e conseqüentemente a uma diminuição da sua concentração no ar atmosférico (Baciú, 2005).

### **1.3.3. Radão na Água**

A presença do radão nas águas subterrâneas deve-se a dois processos distintos. O radão ou é directamente libertado a partir dos grãos minerais para a água, pelo efeito de recuo já descrito (Cowart e Burnett, 1994 *in* Katz *et al.*, 1998) ou é o resultado do decaimento do  $^{226}\text{Ra}$  que se encontra dissolvido na água (Ellins *et al.*,

1991 *in* Katz *et al.*, 1998). De qualquer modo, a concentração deste gás presente na água, é consequência das características geológicas do local, dos conteúdos em urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ) das rochas, das características da superfície do aquífero, da permeabilidade do solo, da temperatura, da pressão, da precipitação, e das características da própria água, como a velocidade de circulação, a quantidade de água presente na rocha, o potencial de oxidação/redução, o pH e a própria composição química da água (Horváth *et al.*, 2000; Selvasekarapandian *et al.*, 2002; López *et al.*, 2004; Voronov, 2004; Hernández *et al.*, 2004).

Estudos realizados por Wollenberg *et al.* (1985) revelam que as nascentes frias apresentam concentrações de radão superiores aos valores encontrados nas nascentes termais. A solubilidade do radão na água é  $0,225 \text{ cm}^3/\text{g}$  a  $20^\circ\text{C}$  e diminui com o incremento da temperatura (López *et al.*, 2004). De acordo com a concentração de radão as águas podem ser classificadas em águas com valores de radão muito baixos, baixos, médios e altos (tabela 1.4):

Tabela 1.4 - Classificação das águas de acordo com o seu conteúdo em radão (Voronov, 2004).

Classe	Concentração de radão, Bq/L
Água com valores de radão muito baixos	185 - 740
Água com valores de radão baixos	740 - 1480
Água com valores de radão médios	1480 - 7400
Água com valores de radão altos	> 7400

O radão tem uma solubilidade elevada na água e pode exalar desta devido a variações de pressão ou à passagem de outros gases como o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$ . A presença de água no solo pode conduzir a uma rápida dissolução do radão presente,

processo que ocorre quando chove. A água da chuva dissolve o radão e ao infiltrar-se transporta-o para zonas mais profundas, baixando assim a concentração deste gás em zonas mais superficiais do solo. Após o período de precipitação, a concentração nas zonas superficiais tende a ser reposta (Garcia-Vindas e Monnin, 2005).

A água presente num aquífero percorre grandes distâncias antes de atingir uma nascente. Se essa água se deslocar a uma velocidade que permita o transporte do radão antes do seu decaimento, então, a nascente será uma zona de grande concentração de radão. Por outro lado, se o aquífero for atravessado por gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ) verificar-se-á a desgaseificação rápida do radão podendo este gás ser totalmente extraído da água e vir a ser concentrado nas zonas superficiais dos solos (Garcia-Vindas e Monnin, 2005).

As águas superficiais apresentam valores de concentração de radão mais baixos (inferiores a 100 pCi/l ou 3700 Bq/m<sup>3</sup>) do que as águas subterrâneas (entre 100 e 1000 pCi/l ou entre 3700 e 37000 Bq/m<sup>3</sup>). Esta diferença é devida à rápida libertação do radão para o ar que ocorre nas águas superficiais devido à diferença de pressão. Assim o radão pode ser um excelente indicador de mistura de águas superficiais com águas subterrâneas (Katz *et al.*, 1998). O estudo de radão na água, para além de poder identificar a origem da água (superficial ou subterrânea), tem sido utilizado (a) na prospecção de depósitos de urânio, (b) na identificação de falhas ocultas, (c) na monitorização de água potável, em minas e em estâncias termais e (e) como precursor de eventos sísmicos e vulcânicos (Choubey *et al.*, 2000; Garcia *et al.*, 2000).

## **1.4. O Radão como Indicador de:**

### **1.4.1. Presença de Falhas**

As concentrações elevadas de radão na superfície terrestre estão normalmente associadas a locais onde as rochas existentes apresentam grandes quantidades de urânio e rádio. No entanto, concentrações anómalas podem também surgir junto a zonas de falhas tectónicas, a rochas carbonatadas carsificadas ou a rochas que apresentem grande fracturação (Swakón *et al.*, 2005).

As anomalias encontradas em zonas de falhas são resultado da migração de radão existente em zonas mais profundas onde a concentração deste gás é maior. Na realidade, nos primeiros metros de solo, a concentração de radão aumenta consideravelmente, com o aumento da profundidade. Assim, como nas zonas de falha a permeabilidade das rochas é maior, devido à fracturação, o geogás presente em zonas de maior profundidade ascende mais facilmente à superfície através destas descontinuidades, arrastando consigo concentrações mais elevadas de radão (King *et al.*, 1996; LaBrecque e Cordoves, 2003).

Estudos realizados por King *et al.* (1996) ao longo de perfis transversais a três falhas activas na Califórnia (EUA) revelam que, nas proximidades destas falhas, a ordem de grandeza dos valores de radão varia entre 1 a 11 vezes os valores encontrados no solo nas zonas mais afastadas das mesmas.

De acordo com Kresl *et al.* (1993a, b *in* Al-Taj *et al.*, 2004), a emissão de radão ao longo de falhas depende de diversos factores tais como: (a) o grau de fracturação; (b) o tipo de material que preenche a falha e (c) a profundidade do plano de falha.

O radão proveniente de zonas mais profundas pode, de acordo com estudos realizados em zona de falhas em Krakow (Polónia) por Swakón *et al.* (2005), ficar aprisionado em zonas mais superficiais se encontrar uma barreira que impeça a sua migração, pelo que a sua ascensão até à superfície, neste caso, fica condicionada à presença de falhas.

A identificação de zonas de exalação anómala de radão pode assim ser utilizada na identificação de falhas activas, na confirmação da presença de falhas ocultas e no mapeamento de falhas (King, 1980; King *et al.*, 1996; Ciotoli *et al.*, 1999).

#### **1.4.2. Actividade Sísmica**

Em resultado do radão possuir um tempo de semi-vida muito curto (3,82 dias) e de ter uma massa elevada (222) este isótopo, na sua deslocação, não se afasta significativamente do seu local de origem (Ciotoli *et al.*, 1999).

Em 1967 e 1975, estudos realizados na Rússia e na China, respectivamente, relacionam variações da concentração de radão na água com a actividade sísmica.

Estas variações, normalmente associadas a um incremento da concentração de radão, precedem a ocorrência de sismos fortes. Trabalhos realizados em falhas activas na zona central da Califórnia, num período compreendido entre 1976 e 1978, identificaram cinco anomalias de radão que precederam sismos ou enxames sísmicos cujas magnitudes variaram entre 4,0 e 4,2, ocorrendo situações em que os valores da concentração deste gás atingiram o dobro dos valores de base (King, 1980). Noutros casos, como aconteceu na China e no Japão, as anomalias da concentração de radão na água surgiram apenas alguns dias antes da ocorrência do sismo principal (Teng, 1980).

Para detectar precursores de sismos a monitorização deve ser feita de modo contínuo e as estações de radão devem estar instaladas em locais onde estes precursores são esperados, como é o caso de falhas ou de zonas de falhas (Chyi *et al.*, 2001). Para além disso, é necessário ter em linha de conta os factores que podem influenciar a concentração de radão nestas zonas de modo a eliminar as variações que não estão relacionadas com eventos sísmicos, tais como a pressão, a precipitação, etc. (Garavaglia *et al.*, 1998).

Na prática, as variações de tensão que antecedem um sismo são suficientes para aumentar a microporosidade na rocha conduzindo à libertação anómala de radão antes da ruptura da rocha (Nishizawa *et al.*, 1998; Coutinho, 2000). Por outro lado, estas variações de tensão podem ainda provocar a movimentação de fluidos que são obrigados a abandonar os poros da rocha e a migrar para os espaços intersticiais,

facilitando assim o transporte de radão, que se encontra dissolvido nestes fluidos, até à superfície (Teng, 1980).

Mas as anomalias de radão que precedem sismos nem sempre são positivas, existem também registos de anomalias negativas que podem ser, segundo Talwani *et al.* (1980), o resultado do fecho de fissuras diminuindo assim a área de emissão do radão ou então do preenchimento, por água com baixa concentração de radão, das novas fendas que se abrem, pelo que, o radão que vai sendo libertado da rocha vai ser dissolvido pela água permanecendo em profundidade.

Assim os locais de anomalias positivas são interpretados como estando associados a regiões de forças compressivas e, conseqüentemente as anomalias negativas a áreas de forças distensivas. A compressão do volume dos poros provoca um fluxo de gás que é obrigado a ascender e a exalar do solo, enquanto que, o aumento do volume dos poros provoca o processo contrário, ou seja, o gás presente na atmosfera é forçado a preencher os poros existentes no solo (Birchard e Libby, 1980).

Existem ainda registos de casos em que sismos são precedidos por anomalias negativas e positivas. É o caso do sismo de Izu-Oshima-Kinkai (Japão) a 14 de Janeiro de 1978. Cinco dias antes do sismo ocorreu um súbito decréscimo da concentração de radão na água seguido de um acentuado incremento mantendo-se os valores elevados até à ocorrência do sismo de magnitude 7 (Wakita *et al.*, 1980). Noutros exemplos, antes da ocorrência dos eventos sísmicos, regista-se um aumento

gradual da concentração de radão na água ou podem verificar-se fortes aumentos seguidos de descidas abruptas (Pulinets *et al.*, 1997).

Deste modo é extremamente difícil relacionar o registo de anomalias de radão com uma futura ocorrência de sismos. Se por um lado diversos estudos parecem indicar que realmente essa relação existe (*e.g.* Talwani *et al.*, 1980), por outro, factores não relacionados com eventos sísmicos podem, em determinado contexto, provocar alterações na concentração de radão conduzindo à ocorrência de anomalias que não são precursoras de actividade sísmica (*e.g.* King, 1980). Também se verifica a ocorrência de sismos que não são precedidos por anomalias de radão (*e.g.* Igarashi e Wakita, 1990 *in* LaBrecque *et al.*, 2001).

### **1.4.3. Erupções Vulcânicas**

Os gases emitidos pelos vulcões podem ser libertados em zonas localizadas, como é o caso de crateras activas ou de fumarolas, ou de um modo difuso, por exemplo, através dos seus flancos. Os gases libertados nas colunas eruptivas são importantes indicadores da dinâmica da câmara magmática e da escala temporal dos processos de desgaseificação (Gauthier *et al.*, 2000). Por outro lado, os gases libertados de modo difuso fornecem informações relativamente à permeabilidade dos edifícios vulcânicos, ao seu potencial para a desgaseificação noutras áreas para além da cratera e à sua capacidade para libertarem grandes quantidades de gases sem ser em zonas localizadas (Stix e Gaonac'h, 2000).

O estudo da desgaseificação dos solos em zonas vulcânicas tem-se revelado de grande importância para a monitorização vulcânica uma vez que, com o aumento da pressão em profundidade, induzido por uma intrusão magmática, e com o aumento da permeabilidade, em resultado da fracturação provocada pela actividade sísmica que normalmente precede as erupções vulcânicas, criam-se as condições ideais para a desgaseificação e para o aparecimento de anomalias que possibilitem identificar falhas profundas. Deste modo, a desgaseificação dos solos possibilita a identificação de zonas de fraqueza nos flancos do vulcão, onde se poderão vir a localizar novos centros eruptivos, para o que é determinante a associação de informações de outra natureza tal como as fornecidas por outras técnicas de monitorização como a Sismologia e a Geodesia (Carapezza, 1996).

No caso do radão, devido ao seu curto tempo de semi-vida, normalmente as variações da concentração observadas no solo são provenientes de zonas mais superficiais do solo e não do magma ou de falhas profundas. No entanto, se existir um meio de transporte suficientemente rápido, então, o radão proveniente de zonas mais profundas ou do magma pode atingir as camadas mais superficiais do solo (Delmelle e Stix, 2000). Assim, o incremento de radão na superfície do solo pode ser resultado (1) de variações da pressão local provocadas por sismos, uma vez que o aumento da pressão conduz ao aumento da temperatura e ao incremento da área de superfície de emissão, como consequência do aumento de fracturação e deformação dos cristais; (2) da ascensão de grandes quantidades de gases (gases de arraste) devido ao aumento da temperatura em resultado de uma intrusão magmática ou ainda (3) da libertação de quantidades elevadas de radão associada à movimentação de magma.

Este tipo de fenómeno foi observado em vulcões como o Karymsky e o Kilauea (Cox, 1980).

De acordo com Gasparini e Mantovani (1978), alterações de temperatura que possam preceder uma erupção vulcânica, conduzem à libertação de radão a partir de fluidos dos poros, de aquíferos, de rochas e de minerais. Teoricamente, e de acordo com os mesmos autores, essa libertação segue o seguinte esquema:

- (a) As rochas, os minerais, os fluidos dos poros e a água subterrânea existentes num edifício vulcânico contêm radão;
- (b) A libertação de fluidos do magma e a sua ascensão até à superfície provoca o aquecimento das rochas encaixantes;
- (c) O radão presente nos fluidos intersticiais e possivelmente na água subterrânea é removido por aquecimento. Em áreas fortemente fracturadas o aquecimento pode ser suficientemente intenso para provocar, por difusão, o escape do radão das rochas e minerais. A passagem de gases por níveis de água pode provocar um reequilíbrio entre as fases gasosas e líquidas conduzindo à remoção do radão destas últimas;
- (d) O radão é transportado para a superfície por difusão ou advecção;
- (e) O radão concentra-se na água subterrânea pouco profunda onde é medido.

Apesar da análise e interpretação das anomalias de radão serem muito complexas, devido ao elevado número de factores que podem influenciar a origem e transporte deste gás, a monitorização contínua da desgaseificação do radão nos solos é uma técnica vantajosa já que possibilita um acompanhamento de crises vulcânicas

de um modo bastante seguro uma vez que pode ser feita a uma distância segura da cratera em erupção e a quantidade de produtos corrosivos é inferior às zonas mais próximas da mesma (Baubron *et al.*, 1991; Connor *et al.*, 1996).

#### **1.4.4. Reservatórios Geotérmicos**

Estudos efectuados em alguns campos geotérmicos (Balcázar *et al.*, 1990) permitiram concluir que:

- (a) Anomalias de radão elevadas foram observadas ao longo de falhas activas;
- (b) Os furos geotérmicos mais produtivos estão normalmente associados a áreas de elevada concentração de radão;
- (c) Estudos da variação, a longo prazo, da concentração de radão podem fornecer algumas indicações sobre a termodinâmica envolvida no campo geotérmico em virtude do radão detectado nas zonas de falhas ser transportado para a superfície por processos de desgaseificação.

Como a temperatura terrestre aumenta com a profundidade e a energia, por seu lado, aumenta com a temperatura, os furos geotérmicos realizados na maior parte das vezes têm profundidades superiores a 1 km, o que encarece muito a prospecção. Assim, torna-se necessário identificar falhas activas, uma vez que estas são bons indicadores da localização do reservatório geotérmico de modo a reduzir o número de furos a realizar (Balcázar *et al.*, 1990). Para tal, a cartografia de anomalias de radão, pode fornecer boas indicações uma vez que, com o aumento da temperatura o coeficiente de emanção e as condições de transporte deste gás são alterados.

Estudos realizados por Gasparini e Mantovani (1978) revelam que cerca de 10 a 12% do radão presente em material rochoso pode ser removido a temperaturas da ordem dos 260 °C. Por outro lado, com o incremento da temperatura diminui o coeficiente de solubilidade do radão na água pelo que este mais facilmente se juntará ao vapor presente no reservatório e poderá ascender à superfície, por convecção, para o que a presença de falhas activas correspondem às trajectórias preferenciais (Cox, 1980).

A análise da cartografia da concentração de radão à superfície, em complemento a dados de Fotogeologia, Hidrogeologia, Vulcanologia e às demais técnicas Geofísicas, pode desempenhar um papel significativo na definição de áreas de interesse geotérmico (Balcázar *et al.*, 1990).

## 1.5. Metodologias de Monitorização do Radão

### 1.5.1. Princípios de Detecção

Os detectores de radão e dos seus produtos de decaimento baseiam-se, normalmente, na detecção das partículas  $\alpha$  resultantes do seu decaimento. Existem alguns aparelhos que detectam ainda partículas  $\beta$  e  $\gamma$ . A escolha do detector e do método a aplicar depende do tipo de medição que se pretende efectuar (se se pretende medir a concentração de radão ou a concentração dos produtos do seu decaimento), do tipo de radiação a detectar, da duração da medição, da informação necessária, da sensibilidade do aparelho e do custo associado (George, 1990).

Os detectores podem ser activos, quando necessitam de energia para poderem efectuar a amostragem, ou passivos, quando tal não é necessário. Os métodos e técnicas de amostragem e medição do radão e dos produtos do seu decaimento podem ser de três tipos: (a) imediato (*grab/instantaneous*) (b) integrado (*integrating*) e (c) contínuo. George (1990) apresenta em detalhe informação sobre cada um destes métodos, assim como dos tipos de detectores associados.

### 1.5.2. Método de Amostragem Imediato

No método de amostragem imediato, tal como o próprio nome indica, as amostragens são efectuadas num curto período de tempo e permitem medir a concentração de radão ou a concentração dos produtos do seu decaimento. Este tipo de medição é muito utilizado na localização de entradas de radão no interior de habitações e na confirmação e calibração de outros métodos e técnicas. Quando se pretende medir a concentração de radão, por este tipo de amostragem, pode-se recorrer ao método da câmara de ionização (*ionization chamber*) ou ao método da célula de cintilação (*Scintillation cell*).

O método da câmara de ionização é ideal quando se pretende uma precisão elevada em locais onde a concentração de radão é baixa, no entanto, estes aparelhos são complexos, caros e exigem mão-de-obra especializada. Estes aparelhos são também muito utilizados na calibração e avaliação de outros detectores. Estas câmaras são construídas em aço inoxidável electropolido de modo a reduzir a radiação de base. O limite de detecção mínimo de uma câmara de 2 litros (L) num período de amostragem de 17 horas é 0,7 mBq.

O método da célula de cintilação é um dos métodos mais antigos e mais utilizados e pode ser aplicado quer em trabalhos de campo quer no laboratório. As células de cintilação são constituídas por um recipiente em metal, vidro ou plástico revestido internamente por sulfureto de zinco activado por prata (ZnS(Ag)). O princípio de detecção aplicado neste método baseia-se na contagem dos fotões provenientes

da interacção das partículas  $\alpha$ , resultantes do decaimento quer do radão quer dos seus produtos de decaimento existentes no interior da célula, com o ZnS(Ag). Esta contagem é feita através de um tubo fotomultiplicador que é acoplado à célula. Este método permite a recolha de amostras em diversos locais, em simultâneo, sendo ideal no diagnóstico da distribuição da concentração do radão em determinada área. A sensibilidade das células de cintilação varia, de acordo com o seu tipo (0,1 L ou 3,0 L), entre os 0,8 e os 16 cph (contagens por hora) por Bq/m<sup>3</sup>.

Por outro lado, se se pretender medir unicamente a concentração dos produtos de decaimento do radão então é necessário recolher átomos dos produtos de decaimento do radão ou então recolher partículas atmosféricas às quais estes átomos estejam associados. Em seguida, faz-se passar num filtro a amostra recolhida com um volume de ar conhecido num intervalo de tempo também ele conhecido. Finalmente procede-se à contagem das partículas  $\alpha$  que ficaram retidas no filtro. A contagem das partículas  $\alpha$  pode ser feita de dois modos distintos: (a) contagem grosseira de partículas  $\alpha$  ou (b) espectrometria de partículas  $\alpha$ .

No primeiro caso, não há discriminação das partículas  $\alpha$  que são resultantes do decaimento do <sup>218</sup>Po das resultantes do decaimento do <sup>214</sup>Po. O sistema de contagem consiste num tubo fotomultiplicador associado a um cintilador ZnS(Ag) que é colocado junto do filtro. Este método tem como vantagem a sua fácil aplicação e alta sensibilidade para fluxos elevados de ar. Para uma amostragem de 5 minutos e um fluxo de 10 L/min, o limite mínimo de detecção para o <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi e PAEC

(*Potential Alpha Energy Concentration*) é 25 Bq/m<sup>3</sup>, 7 Bq/m<sup>3</sup>, 22 Bq/m<sup>3</sup> e 50 nJ/m<sup>3</sup> respectivamente.

A espectrometria de partículas  $\alpha$  é um método mais dispendioso e é utilizado, normalmente, em laboratório. Estes detectores, de barreira de superfície (*surface barrier*) ou de união difusa (*diffused junction*), emitem o espectro das partículas  $\alpha$  que são libertadas pelo <sup>218</sup>Po (6,0 MeV) e pelo <sup>214</sup>Po (7,7 MeV) ou por qualquer outro elemento capaz de emitir este tipo de radiação. Este método é capaz de detectar concentrações inferiores a 20 Bq/m<sup>3</sup>, com uma precisão de 20 %, quando o fluxo é da ordem dos 10 L/min.

Os erros associados a estes dois tipos de contagem resultam normalmente de: (a) medições do volume de ar imprecisas; (b) ineficiência da membrana do filtro e (c) contagem deficiente. Para eliminar estes erros, em termos estatísticos, deve-se amostrar grandes volumes de ar e a contagem deve ser realizada durante e após a amostragem.

### **1.5.3. Método de Amostragem Integrado**

No método de amostragem integrado a amostragem é feita por períodos de tempo que podem variar entre dias, semanas, meses e até anos e o resultado final é a média dos valores medidos ao longo do período de tempo em questão. Quando se pretende medir a concentração de radão, por este tipo de amostragem, pode-se recorrer ao método dos detectores sólidos (SSNTD - *Solid-state nuclear track*

*detectors*), ao método do carbono activo (*Activated carbon*), ao método da câmara de electro-ionização (*Electret-ionization chamber*) ou ao método do monitor de detectores sólidos (*Solid-state detection monitors*).

O princípio da detecção dos detectores sólidos (SSNTD) baseia-se na contagem das marcas deixadas pelas partículas  $\alpha$  em materiais sólidos como películas fotográficas - LR-115 Kodak-Pathé ou CR-39. As películas são colocadas dentro de recipientes onde apenas o radão consegue penetrar, graças à utilização de um filtro que impede a entrada dos produtos do seu decaimento. As partículas  $\alpha$  libertadas imprimem as películas que são depois reveladas por marcadores químicos ou electroquímicos, como uma solução de NaOH, que têm como função aumentar a impressão tornando-a visível. O limite mínimo de detecção, para três meses de exposição é de 2 a 8 Bq/m<sup>3</sup> dependendo da área do detector.

Estes detectores são utilizados na detecção de radão nos solos. Este tipo de detector apresenta como vantagens o seu baixo custo, estabilidade ao longo do tempo e reduzida susceptibilidade a grandes variações quando expostos ao calor, à luz e à humidade. Para além disso, a contagem pode ainda ser feita por aparelhos automáticos. Por outro lado, como é necessário substituí-los regularmente, implica mão-de-obra e dispêndio de tempo, uma vez que é necessário deslocamento até ao local de amostragem, que nem sempre é de fácil acesso. Para além disso, o resultado corresponde à média da concentração de radão para determinado período de tempo, pelo que variações significativas da concentração de radão de curta duração (horas ou dias) podem não ser detectadas (Monnin e Seidel, 1998).

No método do carbono activo a amostragem de radão é feita por difusão passiva do ar, sendo o radão adsorvido pelo carbono activo. O colector é de seguida selado e enviado para o laboratório onde será analisado. No laboratório o radão adsorvido pelo carbono é transferido para um líquido de cintilação através do qual se procede à contagem das partículas emitidas. Estes colectores contêm cerca de 1-2 g de carbono activo e o seu limite mínimo de detecção é de 3,7 Bq/m<sup>3</sup> para uma exposição de dois dias. Este é um método muito barato e simples de ser aplicado, no entanto, o período de exposição não pode ser superior a 7 dias devido ao curto tempo de semi-vida do radão. Este método é frequentemente aplicado na medição da concentração do radão no interior de habitações (George, 1990).

O método da câmara de electro-ionização, é um método passivo que consiste numa câmara com um eléctrodo no fundo e uma entrada com um filtro no topo (Kotrappa *et al.*, 1988). O eléctrodo produz um campo eléctrico no interior da câmara que atrai iões com carga oposta, neste caso, iões resultantes do decaimento do radão e dos produtos de decaimento deste gás (Hussein e Huwait, 1999). O eléctrodo funciona como fonte de um campo eléctrico e como sensor quantitativo. Este método pode ser utilizado no campo e os resultados são obtidos de imediato. Para além disso, este aparelho possibilita, desde que exista carga suficiente no eléctrodo, efectuar várias amostragens que não são afectadas por variações de temperatura e humidade. O limite mínimo de detecção é de 7 Bq/m<sup>3</sup> para um período de exposição de 3 dias (George, 1990). Este método pode ser aplicado quando se pretende medir a

concentração de radão no interior de habitações, na água ou no solo (Hussein e Huwait, 1999).

Os monitores de detectores sólidos utilizam micro-computadores para armazenar e analisar dados (George, 1990). O radão, por difusão, entra no aparelho através de um filtro e as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do radão e dos seus produtos são detectados por um detector sólido de silício. O limite mínimo de detecção é  $4 \text{ Bq/m}^3$  para um período de exposição de 2 dias.

Quando se pretende medir os produtos de decaimento do radão pelo método de amostragem integrado, existem vários detectores que podem ser utilizados, no entanto todos têm por base o mesmo princípio. O ar é aspirado, por uma bomba, a um fluxo constante e passa por uma cabeça de amostragem que é constituída por um detector e por um filtro. Independentemente do tipo de detector utilizado, este é sempre colocado próximo do filtro. Os detectores podem ser: (a) sistemas de dosímetros termoluminescentes (TLD), (b) sistemas de detectores sólidos e (c) sistemas de detecção grosseira de partículas  $\alpha$ .

Nos sistemas de dosímetros termoluminescentes (TLD) os chips utilizados podem ser de fluoreto de cálcio com adição de disprósio ( $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ ) ou de fluoreto de lítio (LiF). As amostragens realizadas com estes aparelhos têm a duração de alguns dias. Durante a amostragem as partículas  $\alpha$ , resultantes dos produtos de decaimento do radão, atravessam o TLD deixando marcas nestes sensores (ausência de pares de electrões). Quando a amostragem está concluída as cabeças de amostragem são

reencaminhadas para o laboratório onde é efectuada a sua análise através de um leitor de TLD. Os TLDs são aquecidos e a luz emitida, quando os electrões ocupam as marcas deixadas vagas, é detectada por um tubo fotomultiplicador. Essa luz é proporcional à média da radiação retida pelo filtro aquando da amostragem. Este método é trabalhoso, requer mão-de-obra especializada e medidas de controlo rigorosas. O limite mínimo de detecção do PAEC varia entre os 2,1 nJ/m<sup>3</sup> e os 10,4 nJ/m<sup>3</sup> para um período de exposição de uma semana, dependendo do fluxo de ar que é aspirado, do tipo de filtro e do material que constitui o TLD.

Nos sistemas de detectores sólidos, tal como descrito anteriormente, o detector utilizado é constituído por materiais sólidos como películas fotográficas do tipo CR-39. Este tipo de detector consegue diferenciar os produtos resultantes do decaimento do <sup>222</sup>Rn dos do <sup>220</sup>Rn, com base na diferença de energia de libertação de partículas  $\alpha$ . As marcas registadas no filme são contadas através do recurso à análise de imagem. O limite mínimo de detecção, para um período de exposição de uma semana, é de 4,2 nJ/m<sup>3</sup>. Este sistema tem a vantagem, devido ao seu tamanho, de ser facilmente enviado por correio (quer para o local de amostragem, quer de volta para o laboratório), por outro lado, é necessário um controlo rigoroso na aplicação deste método.

Os sistemas de detecção grosseira de partículas  $\alpha$  são semelhantes aos utilizados no método de amostragem imediato (cintilação, barreira de superfície ou união difusa). Um dos instrumentos mais utilizados na aplicação deste método é um monitor portátil, que contém uma bomba que aspira ar com um fluxo de 1 L/min. As

partículas  $\alpha$  são contadas por um sistema de detecção semicondutor. O limite mínimo de detecção é de 20 nJ/m<sup>3</sup> para uma exposição de 1 dia. A grande desvantagem na utilização deste método é o seu custo, uma vez que a sua instalação exige um operador especializado.

#### **1.5.4. Método de Amostragem Contínuo**

No método de amostragem contínuo os resultados são obtidos em tempo real. A amostragem é feita por períodos de tempo que podem variar entre 15 a 60 minutos com contagens contínuas e resultados mais fidedignos são obtidos após 2 a 3 horas de amostragem. Este método deve ser aplicado em situações em que a concentração de radão varie significativamente num curto período de tempo e tem a vantagem de fornecer dados em tempo real. Por outro lado, são instrumentos complexos e caros e exigem mão-de-obra especializada. Quando se pretende medir a concentração de radão, por este tipo de amostragem, pode-se recorrer ao método do monitor contínuo de células de cintilação (*Continuous scintillation cell monitor*), ao método do monitor contínuo de radão por difusão passiva (*Passive diffusion continuous radon monitor*), ao método dos detectores sólidos (*Solid state alpha detectors*), ao método da câmara de ionização (*Ionization chamber*) ou ao método do monitor de difusão de radão (*Diffusion radon only-monitor*).

No método do monitor contínuo de células de cintilação o princípio é semelhante ao aplicado no método de amostragem imediato, a única diferença corresponde à passagem contínua de ar por um filtro para remover os produtos de

decaimento do radão ou outras partículas. Estes detectores são constituídos por células de cintilação revestidas internamente por ZnS(Ag) e as partículas  $\alpha$  são detectadas por um tubo fotomultiplicador. O limite mínimo de detecção varia de acordo com o tipo de células e pode oscilar entre 1 e 37 Bq/m<sup>3</sup> para um intervalo de contagem de 30 minutos.

No método do monitor contínuo de radão por difusão passiva é utilizado um detector semelhante ao utilizado no método anterior com excepção da bomba de aspiração de ar. Neste caso, o ar entra no detector por difusão passando por uma espuma de 1 cm de espessura que remove os produtos de decaimento do radão e outras partículas. O seu limite mínimo de detecção é de 37 Bq/m<sup>3</sup> para um intervalo de contagem de 60 minutos.

No método dos detectores sólidos é utilizado um material semiconductor que converte a radiação  $\alpha$  num sinal eléctrico. Este método apresenta a vantagem de determinar electronicamente a energia de cada partícula  $\alpha$ , possibilitando identificar a sua origem (<sup>218</sup>Po ou <sup>214</sup>Po) (Durridge, 2000).

O método da câmara de ionização é um método passivo em que o ar entra na câmara (volume de 0,18 L) por difusão e os produtos de decaimento do radão são removidos electrostaticamente pelo que só são contabilizadas as partículas  $\alpha$  provenientes do decaimento do radão. O limite mínimo de detecção é de 18 Bq/m<sup>3</sup> para uma exposição de 60 minutos (George, 1990).

No método do monitor de difusão de radão é introduzido um eléctrodo carregado no interior da célula de cintilação de modo a remover os produtos de decaimento do radão presentes no interior da mesma. Deste modo, impede-se a deposição destes produtos no ZnS(Ag) de modo a que só as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do radão sejam detectadas e contadas. O tempo de resposta é de 15 minutos e o limite mínimo de detecção é de 10 Bq/m<sup>3</sup> para um intervalo de contagem de 15 minutos.

Se se pretender apenas monitorizar os produtos de decaimento do radão pode-se recorrer a detectores sólidos ou detectores de união difusa. Neste método o ar passa continuamente por uma cabeça de amostragem (filtro e detector) e é aspirado através de uma bomba. Estes detectores são na realidade detectores utilizados no método de amostragem integrado que as empresas fabricantes modificaram para trabalharem de modo contínuo. Estes detectores não fazem uma amostragem contínua no verdadeiro sentido do termo, na realidade, a amostragem e análise é feita em intervalos de minutos até uma hora. A grande diferença deste método para o método de amostragem integrado é a presença de um sistema automático que possibilita uma amostragem e contagem mais frequente. Estes instrumentos possuem um microprocessador que armazena o número de contagens e a hora, apresentam grande sensibilidade e é um método relativamente fácil de ser aplicado. Por outro lado, é um método dispendioso e exige mão-de-obra especializada.

## **2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – VULCÃO DAS FURNAS**

### **2.1. Nota Prévia**

A área de estudo situa-se no Vulcão das Furnas, um dos três vulcões centrais activos da ilha de S. Miguel. Este aparelho vulcânico corresponde a um centro traquítico poligenético que nos últimos 5000 anos exibiu pelo menos 10 erupções vulcânicas, duas das quais já em tempos históricos (Guest *et al.*, 1999).

Considerado um dos vulcões mais activos e perigosos dos Açores, este vulcão, ao longo da sua história eruptiva, tem apresentado todos os tipos de actividade eruptiva, desde erupções efusivas a erupções explosivas com formação de caldeira (Guest *et al.*, 1999).

O Vulcão das Furnas apresenta actualmente várias manifestações de vulcanismo que evidenciam o seu potencial de desgaseificação como, por exemplo, os seus campos fumarólicos, a grande variedade de nascentes de águas termais e águas frias gaseificadas. Neste capítulo pretende-se caracterizar geologicamente a área de estudo.



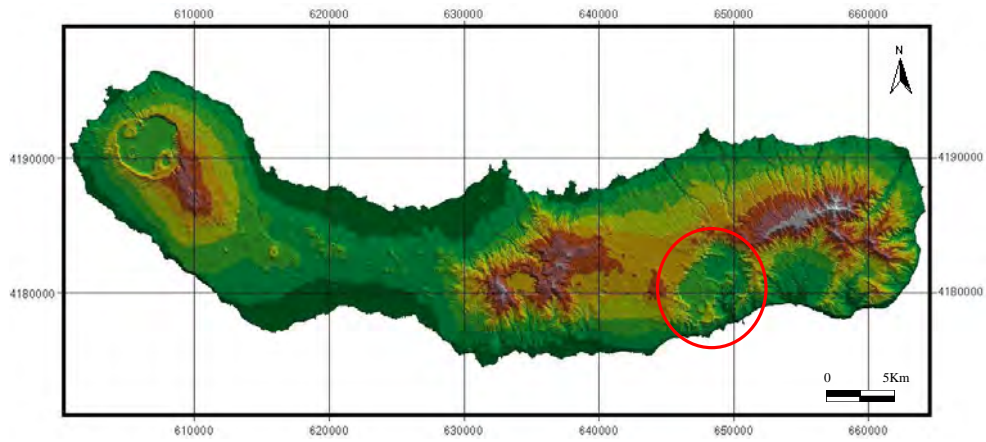



Figura 2.2 - Modelo digital de terreno da ilha de S. Miguel, obtido a partir de dados do Instituto Geográfico do Exército. Sistema de referência UTM; Zona 26S. Legenda:  - Vulcão das Furnas.

## 2.3. Enquadramento Geológico

### 2.3.1. Geomorfologia

O Vulcão das Furnas corresponde a um imponente vulcão central com caldeira apresentando uma cota máxima de 850 m no local denominado Salto do Cavalo, não sobressaindo o seu relevo relativamente à paisagem envolvente, nomeadamente a Oeste o sistema vulcânico da Achada das Furnas e a Este os sistemas vulcânicos do Nordeste e Povoação.

Do ponto de vista geomorfológico o Vulcão das Furnas apresenta uma grande depressão central, onde se reconhecem duas caldeiras vulcânicas que reflectem períodos importantes da evolução do maciço, e outras estruturas vulcânicas tais como cones de escórias, cones de pedra-pomes, maars (*s.l.*) e domos (Gaspar *et al.*, 1995). A caldeira maior, apresenta um diâmetro de 7 por 5,5 km (Gaspar *et al.*, 1995), é a mais antiga com cerca de 30000 anos BP (Guest *et al.*, 1999). O bordo desta caldeira é facilmente identificado a Norte e Nordeste onde corta uma sequência de lavas pertencentes ao complexo vulcânico Povoação/Nordeste. Para Sul este bordo é indistinto devido à deposição de material mais recente e provavelmente à acção tectónica (Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999). Após a formação desta caldeira seguiu-se um período de erupções intra-caldeira que conduziram ao seu preenchimento por material mais recente (Guest *et al.*, 1999).

A segunda caldeira com cerca de 4,5 por 3,5 km de diâmetro (Gaspar *et al.* 1995) formou-se há cerca de 12000–10000 anos BP (Guest *et al.*, 1999). Esta caldeira a Noroeste apresenta o bordo bem definido expondo a sequência de preenchimento da antiga caldeira. Tal como acontece com a mais antiga, o bordo Sul desta caldeira é indistinto (Guest *et al.*, 1999). Após a formação desta segunda caldeira seguiu-se um novo período de preenchimento durante o qual duas das erupções conduziram a importantes colapsos. Uma terá sido responsável pela depressão que compreende, quase na totalidade, a Lagoa das Furnas e a outra corresponde à depressão onde hoje se edifica a freguesia das Furnas e equivale ao centro emissor da erupção que originou o depósito Furnas C (Booth *et al.*, 1978; Pacheco, 1995), datado de há cerca de 1870±120 BP (Guest *et al.*, 1999).

No interior desta grande depressão é possível observar domos e cones de pedra-pomes, enquanto que nos seus flancos encontram-se principalmente cones de escórias (Fig. 2.3). As erupções históricas (1439–1443 e 1630) são as que apresentam, naturalmente, a sua morfologia mais preservada, sendo possível observar anéis pomíticos envolvendo os domos traquíticos (Guest *et al.*, 1999). Existem ainda mais três domos localizados no interior da caldeira que correspondem ao Pico das Marconas, ao Pico das Caldeiras e ao Pico dos Bodes (Gaspar *et al.*, 1995). No exterior da caldeira mais recente também é possível observar estruturas desta natureza, nomeadamente na Terra da Cafuga, no sector Noroeste, cuja disposição em cadeia constitui o alinhamento do Pico de Ferro (Pacheco, 1995). É possível observar ainda, junto do bordo da caldeira externa, um cone de pedra-pomes

designado de Pico do Canário e a Norte pelo menos 10 cones de escórias com escoadas lávicas associadas (Guest *et al.*, 1999).

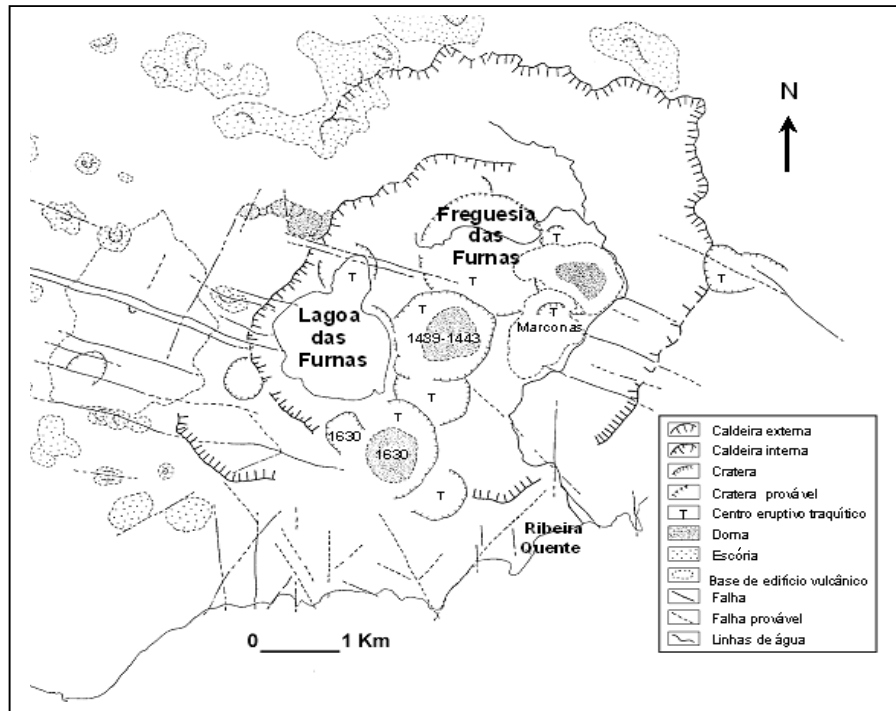


Figura 2.3 – Mapa Morfoestrutural do maciço das Furnas (adaptado de Gaspar *et al.*, 1995).

### 2.3.2. Tectónica

A nível de estruturas tectónicas destaca-se o importante sistema de fracturas de orientação WNW-ESE que atravessa o edifício vulcânico e apresenta uma componente normal associada a uma componente de desligamento direito. Algumas das condutas vulcânicas aparecem alinhadas com esta direcção. Por outro lado, a orientação de alguns vales sugerem a existência de falhas de orientação E-W. Um

outro importante sistema de fracturas que está patente na costa Sul, desde as Amoras até à Ribeira Quente, caracteriza-se pela presença de falhas de direcção N-S e (N)NE-(S)SW. Uma outra estrutura distensiva, com direcção NW-SE, surge paralelamente ao sistema de fracturas regional do “*Rift da Terceira*” (Gaspar *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999).

### 2.3.3. Vulcanoestratigrafia

No que diz respeito à vulcanoestratigrafia do Vulcão das Furnas, os seus produtos vulcânicos foram agrupados em 3 grupos principais por Guest *et al.* (1999): Grupo Inferior, Grupo Intermédio e Grupo Superior (Fig. 2.4). O limite entre o Grupo Inferior e o Intermédio corresponde ao *Ignimbrito da Povoação*, resultado da maior erupção responsável pela formação da caldeira mais antiga, datado de há cerca de 30000 BP. O Grupo Intermédio e o Grupo Superior são separados pelo depósito do Vulcão do Fogo conhecido por Fogo A, datado de há cerca de 4550 BP (Booth *et al.*, 1978) e  $4230\pm 150$  e  $4520\pm 90$  BP (Wallenstein, 1999).

O Grupo Inferior é constituído essencialmente por depósitos de *lapilli* pomítico. É possível observar também depósitos de cinza e de blocos e cinza e uma escoada lávica traquítica (Garajau) (Guest *et al.*, 1999). A Formação do Ignimbrito da Povoação corresponde a um depósito piroclástico de fluxo bastante distinto e apresenta depósitos de *lapilli* de queda, surges, ignimbritos não consolidados e ignimbritos densos bem consolidados (Duncan *et al.*, 1999).

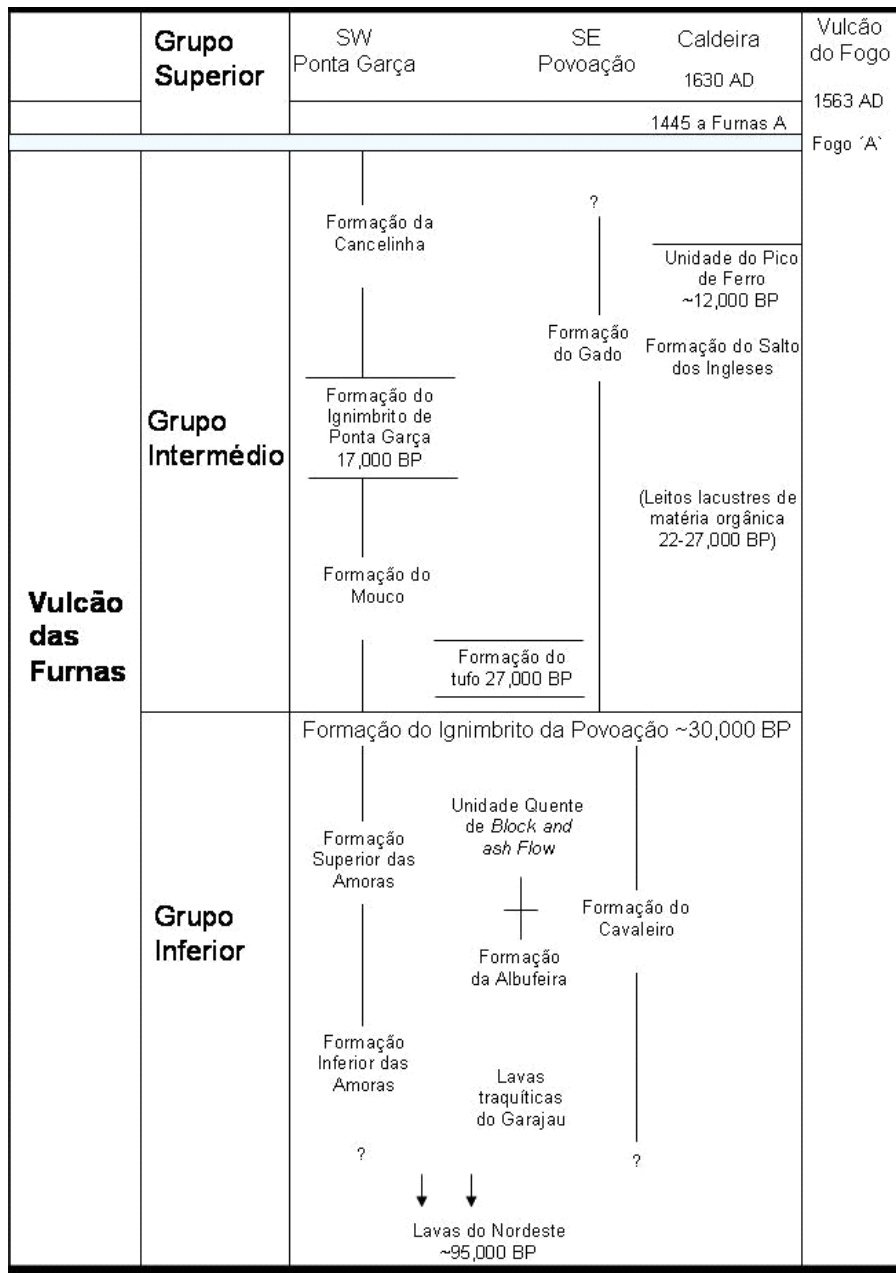


Figura 2.4 – Estratigrafia do Vulcão das Furnas (adaptado de Guest *et al.*, 1999).

O Grupo Intermédio apresenta na sua base depósitos de *lapilli* e cinzas pomíticas e de *lapilli* e cinzas basálticas, assim como uma escoada basáltica na

Formação do Mouco. A estes depósitos sobrepõe-se o Ignimbrito de Ponta Garça e na parte superior deste Grupo pode-se observar novos depósitos de *lapilli* e cinzas pomíticas. A formação da caldeira interna marcou o final deste período de preenchimento da caldeira exterior e, de acordo com Guest *et al.* (1999) pode estar associada à formação de um ignimbrito.

O Grupo Superior é formado pelos depósitos das erupções deste vulcão que ocorreram nos últimos 5000 anos (Guest *et al.*, 1999). Os depósitos de cada uma destas erupções estão bem definidos e caracterizados e são uniformes no tipo de depósito a que deram origem, ou seja, depósitos estratificados de cinzas e *lapilli*. Estes depósitos reflectem o tipo de actividade que caracterizou cada uma destas erupções, isto é, períodos de actividade magmática que alternaram com períodos de actividade hidromagmática, em resultado quer da interacção do magma com o sistema hidrotermal deste vulcão quer com as lagoas existentes no interior da caldeira (Cole *et al.*, 1999).

## 2.4. Erupções e Sismicidade Históricas

### 2.4.1. Erupções Históricas

No Vulcão das Furnas há a assinalar a ocorrência de duas erupções históricas (Fig. 2.5). A primeira, não tendo data exacta, terá ocorrido no início do povoamento da ilha, o que aconteceu no período entre 1439 e 1443 (Queiroz *et al.*, 1995) e a segunda em 1630 (Guest *et al.*, 1999).

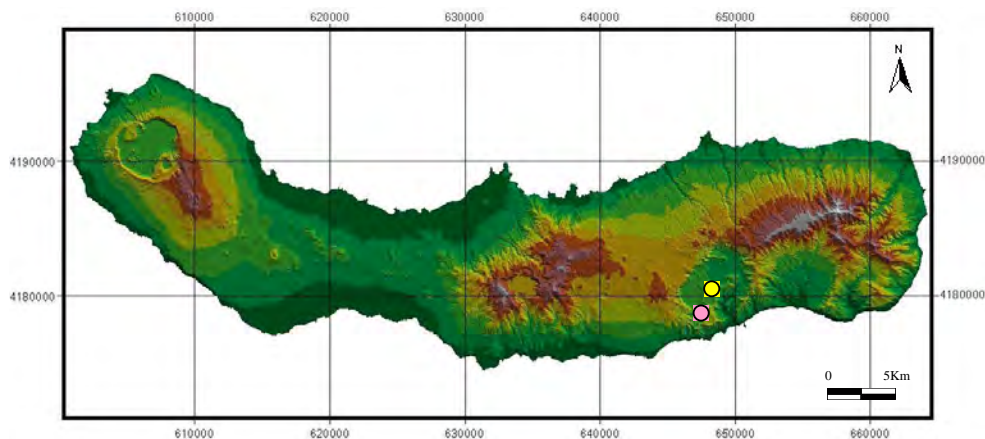


Figura 2.5 – Centros eruptivos do vulcanismo histórico do Vulcão das Furnas. Legenda: ● erupção de 1439- 1443 e ○ erupção de 1630 (adaptado de Silveira, 2002).

De acordo com Queiroz *et al.* (1995), descrições históricas dos primeiros povoadores de S. Miguel apontam para a ocorrência de uma erupção vulcânica na época da sua chegada à ilha. Estudos geológicos efectuados por estes autores identificam o centro desta actividade vulcânica como sendo o Pico do Gaspar, que

corresponde a um cone de pedra-pomes em cuja cratera se edificou um domo traquítico. A fase inicial desta erupção terá apresentado um carácter explosivo e, pelas descrições históricas existentes, deverá ter antecedido a chegada dos primeiros povoadores a esta ilha. Estes terão assim assistido à actividade efusiva desta erupção, associada ao crescimento de um domo lávico.

A erupção de 1630 teve início no dia 3 de Setembro e o seu centro eruptivo localizou-se perto do bordo Sul da caldeira. A actividade eruptiva que numa fase inicial foi explosiva, subpliniana, terminou com a instalação de um domo, assemelhando-se em termos de evolução à erupção anterior. Esta actividade eruptiva foi precedida, de acordo com relatos históricos, por uma actividade sísmica intensa e quase contínua e por movimentos de massa (Cole *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999). Esta erupção apresentou períodos de actividade magmática explosiva que alternaram com períodos de actividade freatomagmática, pelo que os seus depósitos apresentam estratificação de *lapilli* e cinza pomítica correspondentes a cada um destes episódios (Cole *et al.*, 1995).

No total esta erupção provocou cerca de 150 vítimas. Destas, 30 resultaram da explosão inicial, cerca de 80 faleceram em Ponta Garça em resultado de uma escoada piroclástica (*surge*) e as restantes pereceram devido a colapsos de casas, quer devido à actividade sísmica, quer como resultado da deposição de cinzas nos telhados (Cole *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999).

### 2.4.2. Sismicidade Histórica

O arquipélago dos Açores corresponde a uma zona propícia à ocorrência de sismos. A sua localização numa zona de fronteira de três placas litosféricas, onde se desenvolve um significativo magmatismo, faz destas ilhas palco de uma sismicidade significativa (Fig. 2.6).

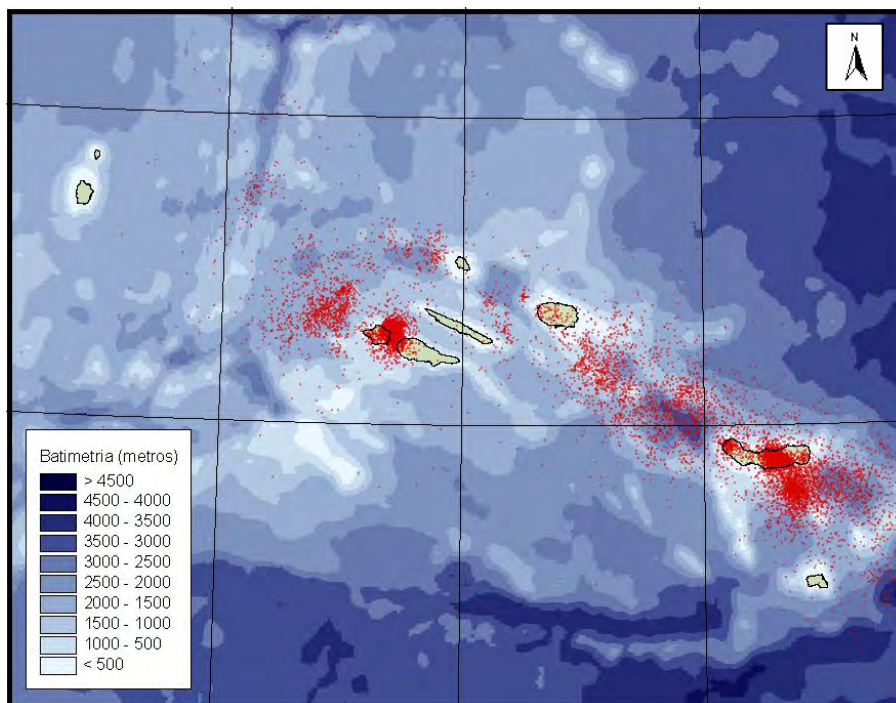


Figura 2.6 – Carta de sismicidade dos Açores (SIVISA, 2003).

A região das Furnas foi ao longo dos tempos históricos afectada por diversos sismos tectónicos gerados em várias regiões sismogénicas e, mais directamente, pela actividade sísmica associada às erupções mencionadas. De entre os sismos

tectónicos históricos salientam-se os de 22 de Outubro de 1522; 26 de Julho de 1591; 16 de Abril de 1852; 5 de Agosto de 1932; 27 de Abril de 1935 e 26 de Junho de 1952.

O sismo de 22 de Outubro de 1522 provocou estragos em toda a ilha de S. Miguel. Vila Franca do Campo, que na altura era o principal centro populacional e capital da ilha, foi fortemente atingida tendo sido em grande parte destruída pelo sismo e pelo grande movimento de vertente que se lhe seguiu e que a soterrou quase na totalidade (Marques, 2004). Em resultado desta catástrofe terão perecido cerca de 5 mil pessoas (Frutuoso, 1522-1591). Em 2002, Silveira com base na análise dos relatos históricos existentes sugeriu uma intensidade máxima, para este sismo, de grau X (EMS-98) em Vila Franca do Campo (Fig. 2.7-a).

O sismo de 26 de Julho de 1591 foi também sentido em toda a ilha de S. Miguel e as suas réplicas fizeram-se sentir até ao dia 12 de Agosto desse ano. As zonas mais afectadas foram Água do Pau e Vila Franca do Campo onde colapsaram várias habitações e foram registadas várias vítimas que ficaram soterradas nos escombros. De acordo com Silveira (2002) a intensidade deste sismo nas zonas mais afectadas terá sido VIII (EMS-98) ou superior (Fig. 2.7-b). Este sismo terá sido ainda acompanhado pela ocorrência de movimentos de massa, abertura de fendas no solo e pelo surgimento de uma nascente temporária (4 dias).

O sismo de 16 de Abril de 1852 afectou toda a ilha de S. Miguel e em especial o concelho da Ribeira Grande. Este sismo foi acompanhado por várias réplicas e provocou a morte a nove pessoas, algumas ficaram soterradas nos escombros das

suas casas e outras foram atingidas na sequência da queda de pedras. Silveira (2002) atribuiu uma intensidade máxima a este sismo de VIII (EMS-98). Nas Furnas o sismo foi sentido, mas não existem relatos de qualquer dano pelo que a esta zona foi atribuído o grau IV a V da mesma escala (Fig. 2.7-c).

O sismo de 5 de Agosto de 1932 foi um dos mais importantes sismos sentidos na ilha de S. Miguel, causando vários danos materiais em especial no concelho da Povoação. Neste evento não há registo de vítimas mortais. A intensidade máxima deste sismo terá sido, de acordo com Silveira (2002), grau VIII (EMS-98) em Água Retorta (Fig. 2.7-d). Na Freguesia das Furnas apareceram fendas na igreja de Sant`Ana, numa das casa do Estaleiro e no edifício das Termas e caiu uma trave de uma das habitações. A esta localidade Silveira (2002) atribuiu o grau V a VI (EMS-98).

A 27 de Abril de 1935 a ilha de S. Miguel sofreu novo abalo sísmico, novamente foi o concelho da Povoação o mais afectado registando-se importantes danos materiais, alguns feridos devido à queda de pedras de paredes e de muros e uma vítima mortal. A intensidade máxima atribuída a este sismo por Silveira (2002) é de IX (EMS-98) na Lomba do Cavaleiro (Fig. 2.7-e). Nas Furnas apenas há registo de fendas em algumas habitações antigas tendo sido atribuído a esta localidade o grau V (Silveira, 2002).

Em 1952, a 26 de Junho, um novo sismo fez-se sentir na ilha de S. Miguel. Os concelhos mais afectados por este sismo foram o da Povoação e o de Vila Franca do Campo não havendo vítimas mortais a registar. O evento principal foi precedido por

pequenos abalos premonitórios alguns dias antes e foram sentidas réplicas até ao mês de Setembro deste ano. A intensidade máxima deste sismo atingiu, segundo Silveira (2002), o grau VIII (EMS-98) no lugar do Fogo na Ribeira Quente (Fig. 2.7-f). Nas Furnas foram sentidos cinco sismos não havendo danos graves a reportar, apenas ligeiras fendas em habitações. Nesta localidade os prejuízos correspondem, de acordo com Silveira (2002), ao grau V (EMS-98).

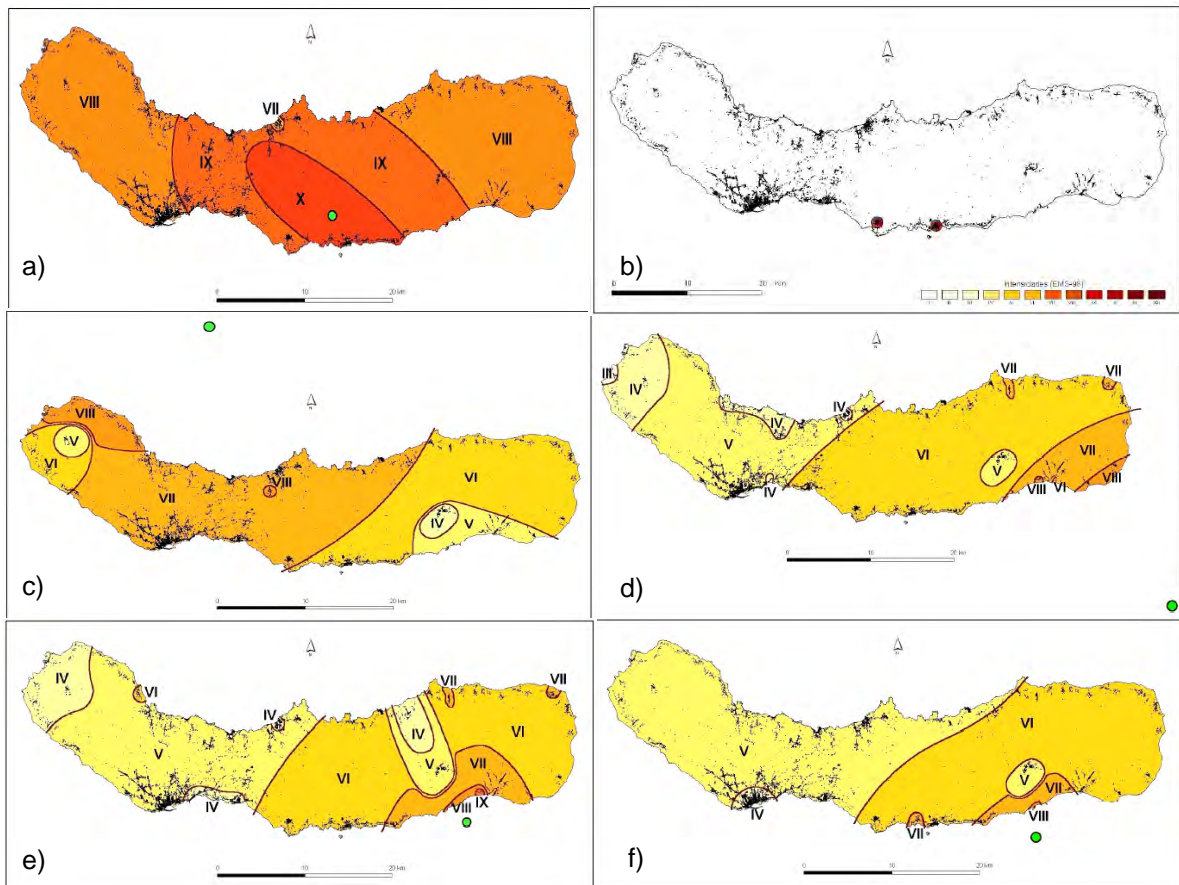


Figura 2.7 – Cartas de isossistas dos sismos de: a) 22 de Outubro de 1522 b) 26 de Julho de 1591 c) 16 de Abril de 1852 d) 5 de Agosto de 1932 e) 27 de Abril de 1935 f) 26 de Junho de 1952 (intensidades EMS-98). Legenda: ● - Localização aproximada dos epicentros (adaptado de Silveira, 2002).

Segundo Silveira (2002), a análise das cartas de isossistas destes sismos (Fig. 2.7), permitiram constatar que a zona das Furnas é caracterizada por valores de intensidade sísmica anómalos. Nesta zona as intensidades sísmicas são sistematicamente mais baixas, facto que, de acordo com Silveira (2002), pode estar associado à presença de uma câmara magmática sob este aparelho vulcânico.

A informação relativa à actividade sísmica associada às erupções históricas, que decorreram no interior da caldeira deste vulcão, é relativamente escassa. No entanto, no que se refere à erupção de 1439-1443, a análise de relatos históricos sugere que esta foi acompanhada por actividade sísmica que aterrorizou os primeiros povoadores da ilha de S. Miguel, não tendo estes regressado novamente ao Reino apenas por ausência de embarcação (Queiroz *et al.*, 1995). A actividade sísmica associada à erupção de 1630 foi apenas sentida pela população algumas horas antes do início da erupção e fez-se sentir a 30 km de distância, em Ponta Delgada. Esta actividade sísmica provocou bastantes danos, causando a destruição de quase todos os edifícios num raio de 10 km. Os eventos de maior intensidade deverão estar associados ao processo de abertura da conduta e à primeira fase da erupção (Cole *et al.*, 1995; Silveira, 2002). Os efeitos desta crise, segundo Silveira (2002), podem ser equiparados a um sismo de intensidade igual ou superior a VIII na escala EMS-98 no Vale das Furnas. A zona epicentral deverá ter-se localizado numa zona ampla sob e nas imediações do Vulcão das Furnas.

## 2.5. Zonas de Desgaseificação

A desgaseificação do Vulcão das Furnas é fortemente condicionada pelas estruturas tectónicas regionais que atravessam este vulcão e cuja expressão à superfície se traduz pela presença de fumarolas e de águas termais (Cruz *et al.*, 1999).

São quatro os campos fumarólicos associados a este vulcão: Lagoa das Furnas, Freguesia das Furnas, Ribeira dos Tambores e Ribeira Quente (Ferreira, 1994). O campo fumarólico da Lagoa das Furnas localiza-se no interior da caldeira interna na margem Norte da Lagoa das Furnas, o da Freguesia das Furnas localiza-se, tal como o próprio nome indica, na freguesia com a mesma designação e é o maior dos quatro (Foto 2.1), o da Ribeira dos Tambores situa-se a Sudeste do campo fumarólico da Freguesia das Furnas e estas fumarolas emanam a partir de uma fissura existente no domo traquítico do Pico das Marconas (Ferreira e Oskarsson, 1999). Finalmente o último campo fumarólico, é mais disperso, encontra-se no flanco Sul deste vulcão e as emissões distribuem-se ao longo da ribeira da Ribeira Quente e na freguesia da Ribeira Quente (Ferreira, 1994). A composição química destas fumarolas é maioritariamente CO<sub>2</sub> juvenil e como constituintes subordinados apresenta H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e Ar (Ferreira, 2000).



Fotografia 2.1 – Campo fumarólico da Freguesia das Furnas.

A desgaseificação deste vulcão não ocorre apenas em zonas localizadas, tais como fumarolas e nascentes, existindo também, de modo difuso através dos solos um pouco por toda a caldeira. Dos trabalhos referentes à desgaseificação difusa do Vulcão das Furnas salientam-se os relacionados com a determinação da concentração de CO<sub>2</sub> (e.g. Baubron *et al.*, 1994; Oskarsson *et al.*, 1999; Baxter *et al.*, 1999; Sousa 2003), do fluxo de CO<sub>2</sub> (e.g. Viveiros, 2003) e da concentração de radão (e.g. Baxter *et al.*, 1999).

No Vulcão das Furnas existem várias nascentes termais e nascentes de água fria gaseificada. As primeiras provêm de aquíferos pouco profundos que são aquecidas devido à intrusão de um corpo magmático na sua proximidade e as gaseificadas ocorrem na zona de anomalia de desgaseificação difusa de CO<sub>2</sub> da caldeira, daí que sejam ricas em dióxido de carbono (Cruz *et al.*, 1999).

### 3. CARTOGRAFIA DE RADÃO NO SOLO

#### 3.1. Nota Prévia

Nas regiões vulcânicas grande parte dos gases vulcânicos são libertados a temperaturas elevadas através da cratera de vulcões activos, ocorrendo também a desgaseificação a baixas temperaturas através do solo (Allard *et al.*, 1991; Stix e Gaonac'h, 2000).

A desgaseificação difusa através dos solos não se processa de forma homogénea na superfície terrestre. Em regiões vulcânicas concentrações de radão elevadas surgem associadas a rochas evoluídas que apresentam grandes quantidades de urânio e rádio, a zonas hidrotermais ou ainda a zonas de falhas.

No sentido de se conhecer o padrão de distribuição do radão no solo na área onde se situa a Freguesia das Furnas, procedeu-se a um levantamento da concentração deste gás nos solos através de várias campanhas efectuadas no período compreendido entre Julho e Novembro de 2005, para o qual, no presente capítulo, se descreve a metodologia aplicada e se apresentam e discutem os resultados obtidos.

## 3.2. Metodologia

### 3.2.1. Equipamento

#### 3.2.1.1. Detector de $^{222}\text{Rn}$

A medição da concentração de radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) no solo foi efectuada com um equipamento que opera com base num detector de estado sólido (*solid state detector*) de material semiconductor. O equipamento utilizado corresponde ao DurrIDGE RAD7, modelo 711, versão 2,5 e é fabricado pela DurrIDGE Company, Inc. (EUA) (Foto 3.1) e enquadra-se no método de amostragem contínuo.

Este equipamento dispõe de uma célula interna de amostragem que corresponde a um hemisfério de 0,7 litros revestido por um material condutor eléctrico. As partículas  $\alpha$  são detectadas por um detector sólido de silício (material semiconductor) que se encontra no centro deste hemisfério. O campo eléctrico que se gera no hemisfério atrai partículas  $\alpha$  carregadas positivamente para o detector que converte a radiação  $\alpha$  num sinal eléctrico. Através da aplicação da espectrometria de partículas  $\alpha$  o microprocessador consegue distinguir qual o isótopo emissor de radiação pela respectiva energia (DurrIDGE Company, 2000).



Fotografia 3.1 – Equipamento de medição da concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , marca DurrIDGE RAD7, modelo 711 e versão 2,5.

O espectro obtido apresenta uma escala de energias de partículas  $\alpha$  que varia entre os 0 e os 10 MeV, dividida em 8 janelas que correspondem a intervalos de energia. As janelas A ( $^{218}\text{Po}$ ) e C ( $^{214}\text{Po}$ ) contabilizam a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  (Fig. 3.1) e as janelas B e D contabilizam a concentração de torão ( $^{220}\text{Rn}$ ). A janela E corresponde a uma janela de energias elevadas e tem como principal função o diagnóstico de funcionamento do equipamento e F, G e H contabilizam o ruído. Finalmente a janela O faz a contagem do que não se enquadra em nenhuma das janelas anteriores (DurrIDGE Company, 2000).

O RAD7 possibilita a realização da amostragem em três modos distintos: *Sniff* (cheiro), *Normal* e *Auto*. Para a cartografia de  $^{222}\text{Rn}$  no solo foi utilizado o modo *Sniff* já que este permite uma amostragem rápida de um ponto uma vez que só são contabilizadas as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do  $^{218}\text{Po}$  (janela A), sendo ignoradas as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do  $^{214}\text{Po}$  (janela C).

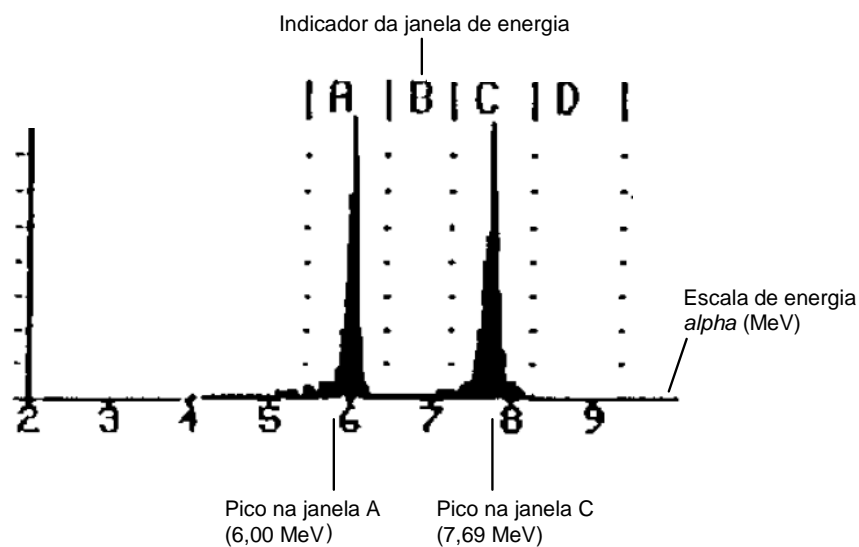


Figura 3.1 - Espectro de energias alfa (adaptado de Durrige Company, 2000).

O  $^{218}\text{Po}$  tem um tempo de semi-vida de 3 minutos o que significa que depois de se iniciar uma medição demorará cerca de 15 minutos para que a contagem atinja o equilíbrio com a concentração de  $^{222}\text{Rn}$ . Assim, este equipamento consegue em 15 minutos fazer uma leitura da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  mesmo que haja grandes oscilações de concentração deste gás de um ponto de amostragem para outro (Durrige Company, 2000).

Este equipamento consegue medir valores num intervalo de concentrações entre os 4 e os 400000 Bq/m<sup>3</sup> com uma precisão de  $\pm 5\%$  (DurrIDGE Company, 2000).

### 3.2.1.2. Outros Materiais Utilizados

Para a medição da temperatura no solo nos pontos amostrados utilizou-se um termómetro da *HANNA Instruments*, modelo HI 93531. Este termómetro efectua medições de valores situados entre os -200 e os 1000 °C ( $\pm 0,2\%$ ) com uma resolução de 0,1%. Foi empregue uma sonda termopar de alta temperatura (1100 °C) com cerca de 25,5 cm de comprimento e 1,5 mm de diâmetro (*HANNA Instruments*, 1997).

Os vários pontos amostrados foram georeferenciados com o auxílio de um GPS, da GARMIN, modelo GPSmap 76S e foram ainda utilizadas fotografias aéreas e a carta militar 1:25000 da área em estudo.

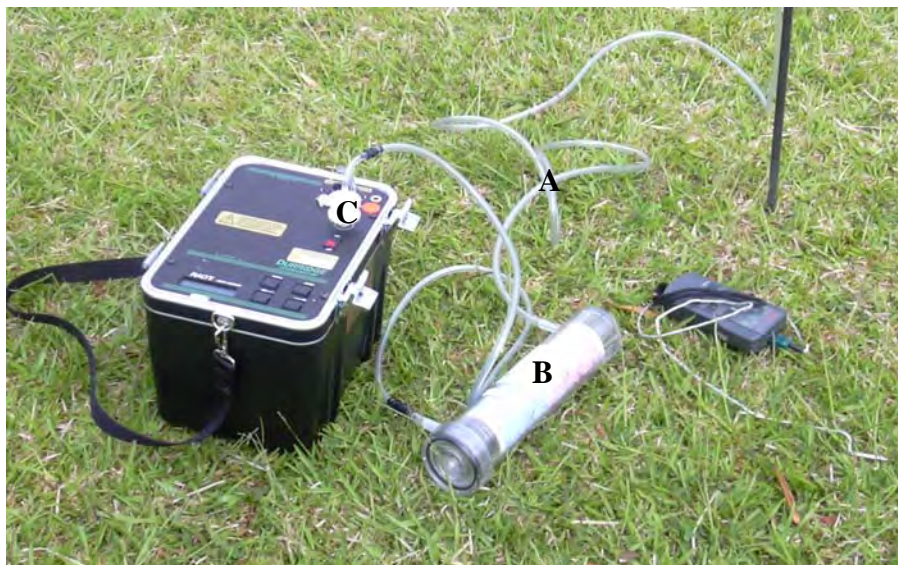
Para a amostragem da concentração de radão no solo foram ainda utilizados:

- (a) Sondas de ferro de 1,20 m de comprimento e 1 cm de diâmetro;
- (b) Martelo (cilindro com cerca de 10 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro externo);
- (c) Tubos de silicone e conectores;
- (d) Unidade dessecante (*laboratory drying unit* - Drierite);
- (e) Filtros 0,45 microns (*inlet*);
- (f) Parafusos  $\frac{3}{4}$  7;
- (g) Luvas de jardineiro.

### 3.2.2. Amostragem

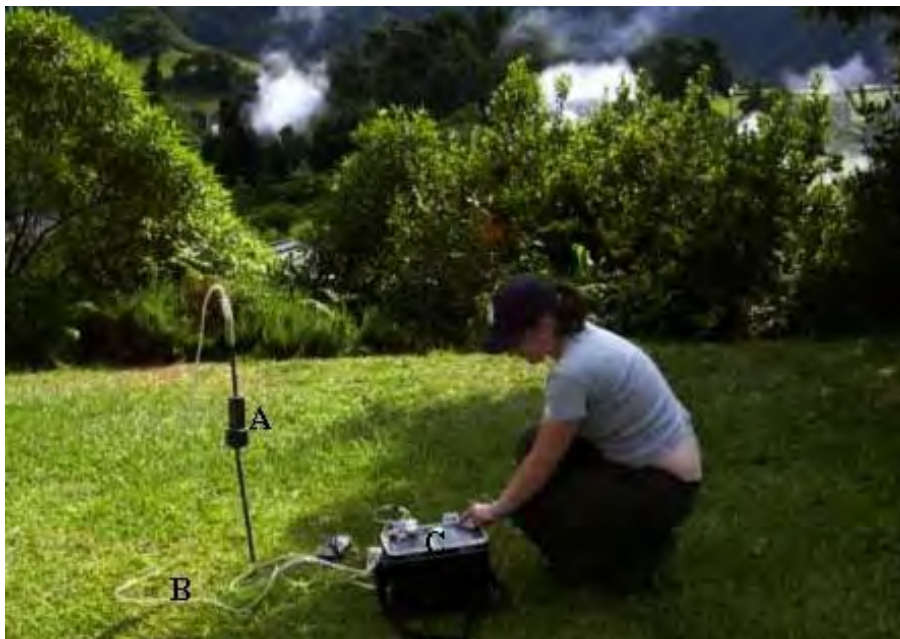
Para a realização da cartografia de radão no solo a amostragem foi efectuada do modo que a seguir se descreve. A sonda de ferro foi introduzida no solo, com a ajuda do martelo, até uma profundidade de aproximadamente 60 cm. Nesta operação foi necessário obstruir a ponta da sonda com um parafuso de modo a evitar a entrada de solo para o seu interior.

De seguida, ligou-se a sonda ao equipamento recorrendo à utilização de tubos de silicone. Os tubos de silicone encontravam-se ligados à unidade dessecante, de forma a evitar a entrada de humidade para o interior do equipamento, e a filtros, de modo a impedir a entrada de poeiras e dos produtos de decaimento do radão para o interior do detector (Foto 3.2).



Fotografia 3.2 – Montagem do equipamento. Legenda: A - tubos de silicone; B – unidade dessecante; C – filtros.

O passo seguinte consistiu em levantar a sonda do solo cerca de 3 a 4 cm de forma a que o parafuso se liberte e a sonda fique desobstruída. Nesta fase, com o equipamento completamente montado, procedeu-se ao início da amostragem (Foto 3.3). O equipamento, em modo *Sniff*, aspirou e contabilizou o  $^{222}\text{Rn}$  que foi introduzido no aparelho durante um período de 15 minutos. Neste modo, tal como referido anteriormente, apenas são contabilizadas as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do  $^{218}\text{Po}$  (janela A).



Fotografia 3.3 – Medição da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo. Legenda: A - sonda de ferro; B – tubos de silicone; C – RAD7.

No final de cada medição fez-se a leitura dos valores obtidos. Paralelamente observou-se o valor da humidade interna registado. Este deverá ser sempre inferior a 10%, para uma boa determinação da concentração de  $^{222}\text{Rn}$ . Caso seja superior a esta percentagem a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  estará subavaliada. No final de cada leitura foi

necessário proceder à limpeza do detector para evitar que partículas  $\alpha$  que permanecessem no interior do aparelho fossem contabilizadas na amostragem seguinte. Para este efeito o equipamento dispõe ainda de uma função de limpeza, modo de purga (*purge*), que consiste na passagem de ar atmosférico no detector durante cerca de 10 minutos. Neste processo o detector deixa de fazer contagens e a câmara de amostragem é limpa de todos os resíduos.

Para a medição da temperatura no solo, foi introduzido o sensor da temperatura no orifício deixado pela sonda de amostragem, até que o valor da temperatura no visor estabilize.

Finalmente as coordenadas UTM do ponto amostrado, a concentração de radão e a temperatura do solo foram registadas. Para além deste registo, a localização aproximada e a identificação do ponto (referência) foram assinalados na carta topográfica da área.

Neste estudo não foi utilizada uma malha de amostragem regular. Os pontos apresentam uma distribuição aleatória, sendo a malha mais densa na zona habitada e sempre que eram encontrados locais de concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  mais elevadas (Fig. 3.2).

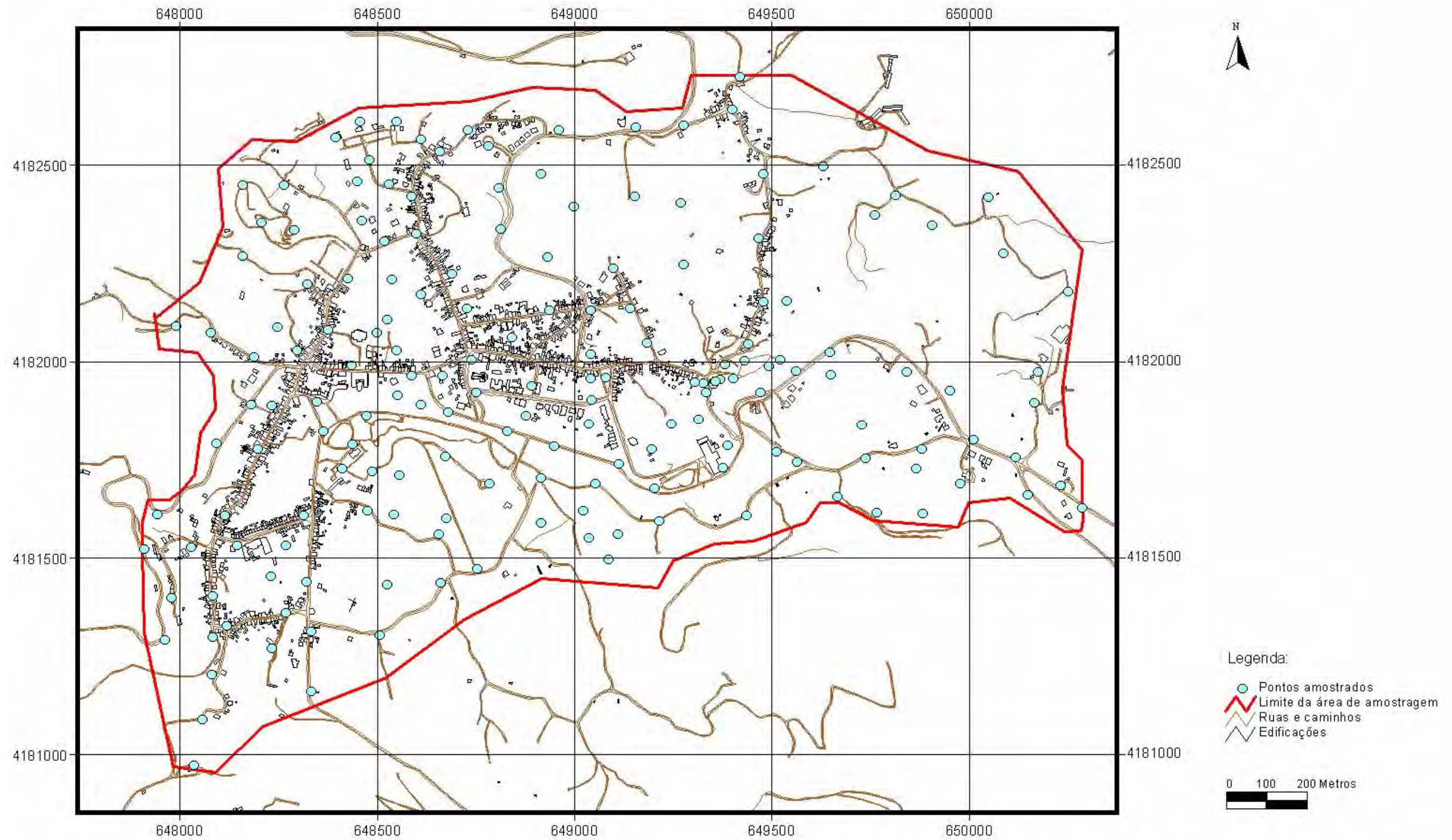


Figura 3.2 - Localização dos pontos de amostragem na área cartografada.

### 3.2.3. Parâmetros Meteorológicos

O período de amostragem abrangeu duas estações do ano distintas (Verão e Outono). Para se ter uma noção da influência dos parâmetros meteorológicos durante as campanhas, recorreu-se aos dados registados pelos sensores meteorológicos que se encontram acoplados à estação fixa de fluxo de CO<sub>2</sub> no solo – GFUR1 (Foto 3.4).



Fotografia 3.4 – Estação de Fluxo de CO<sub>2</sub> no solo (GFUR1) com sensores meteorológicos acoplados.

A estação GFUR1 localiza-se no jardim do Centro Termal das Furnas e os seus sensores meteorológicos fornecem informações sobre a pressão barométrica, pluviosidade, direcção e velocidade do vento, temperatura e humidade relativa do ar e temperatura e humidade do solo.

#### **3.2.4. Recolha e Tratamento de Dados.**

Os dados de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  registados foram transferidos para um computador portátil ou PC através de *software* específico, o CAPTURE 1.2 (DurrIDGE Company). Normalmente esta operação é feita a cada 10 medições.

Ao ficheiro de dados obtido (formato *Microsoft Excel*) é adicionada informação complementar para cada ponto que inclui a sua respectiva referência, as coordenadas M e P e a temperatura do solo. Estes dados são posteriormente tratados para a elaboração das respectivas cartas de anomalias no solo.

Os valores obtidos pelos sensores meteorológicos são introduzidos e tratados também em formato *Excel*.

### 3.3. Apresentação dos Resultados

Para a realização da cartografia de anomalias de radão no solo foram considerados 175 pontos de amostragem. Em cada um destes pontos efectuou-se a medição da concentração de radão e da temperatura no solo. Os valores obtidos podem ser consultados em formato digital no anexo I. Os valores da concentração determinados oscilaram entre 45,9 e 110808 Bq/m<sup>3</sup> e os da temperatura entre 16,5 e 100 °C (tabela 3.1).

Tabela 3.1- Valor máximo, mínimo e médio da concentração de <sup>222</sup>Rn e da temperatura do solo na área amostrada.

	Concentração de <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)
Valor Máximo	110808,0	100,0
Valor Mínimo	45,9	16,5
Valor Médio	6 702,0	24,6

## **3.4. Discussão**

### **3.4.1. Campanhas Realizadas**

O trabalho de campo para a realização da cartografia de radão no solo distribuiu-se por três campanhas que decorreram num período compreendido entre Julho e Novembro de 2005. Tal como referido anteriormente, como as campanhas foram realizadas em duas estações do ano distintas procurou-se avaliar em que medida as diferentes condições meteorológicas poderiam influenciar os resultados obtidos.

Para o efeito considerou-se o trabalho desenvolvido por Viveiros (2003) sobre a influência dos factores meteorológicos na desgaseificação difusa do Vulcão das Furnas. De acordo com este estudo, os factores meteorológicos que parecem exercer uma influência predominante sobre o fluxo de CO<sub>2</sub> no solo são a pressão barométrica, a pluviosidade e a humidade no solo. No presente trabalho foram utilizados os dados dos sensores adicionais da estação GFUR1 correspondentes ao período de amostragem.

A projecção dos valores da concentração de radão no solo (Fig. 3.3) mostra que estes variam entre os 0 e os 20000 Bq/m<sup>3</sup>, independentemente da data de realização da amostragem. De todos os pontos amostrados apenas sete apresentam valores superiores.

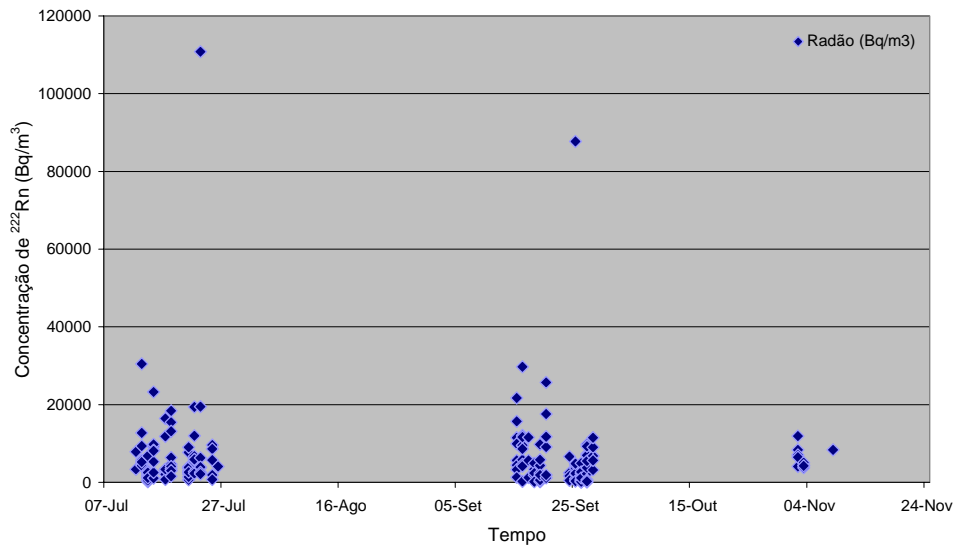


Figura 3.3 – Projecção dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo no período de amostragem.

Na figura 3.4 apresenta-se a variação da pressão barométrica durante o período de amostragem. Verifica-se que os valores da pressão barométrica apresentam ligeiras oscilações. No entanto, como as suas variações durante a

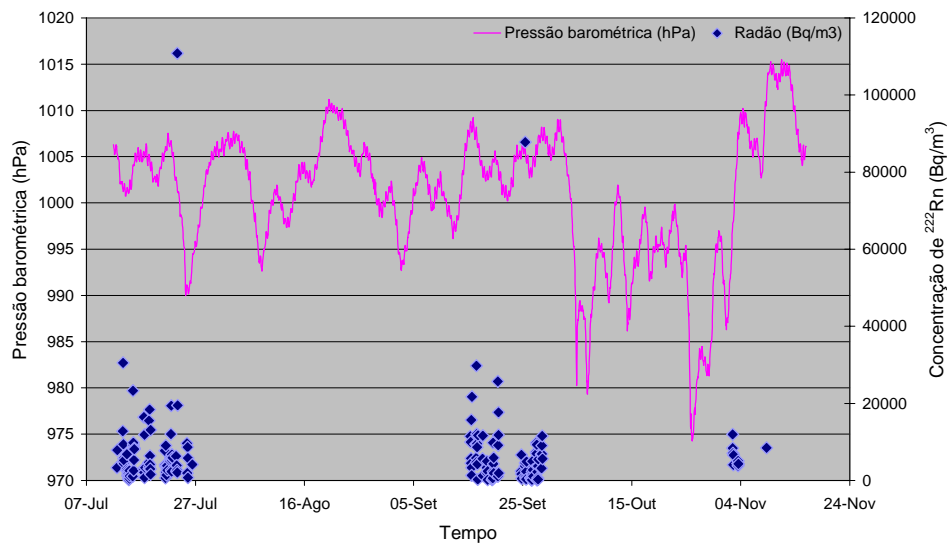


Figura 3.4 – Projecção dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da pressão barométrica no período de amostragem.

amostragem de Julho, Setembro e Novembro são semelhantes, considera-se que a sua influência no início e no final do período de amostragem será sensivelmente a mesma e como tal não introduz variações identificáveis.

No que respeita à pluviosidade, procurou-se que as campanhas de amostragem decorressem em dias de pluviosidade nula ou muito reduzida, por motivos que se prendem com aspectos de operacionalidade do equipamento e com a própria permeabilidade do solo (Fig. 3.5). Assim sendo, a influência directa da pluviosidade na concentração de radão não será aqui discutida. No entanto, verifica-se, ao longo do período de amostragem, um incremento nos valores da humidade no solo como consequência de períodos de maior pluviosidade que antecederam os trabalhos de campo (Fig. 3.6). Como cada ponto foi amostrado apenas uma vez não é possível concluir qual a influência do incremento da humidade no solo nos valores de concentração de radão obtidos (Fig. 3.7).

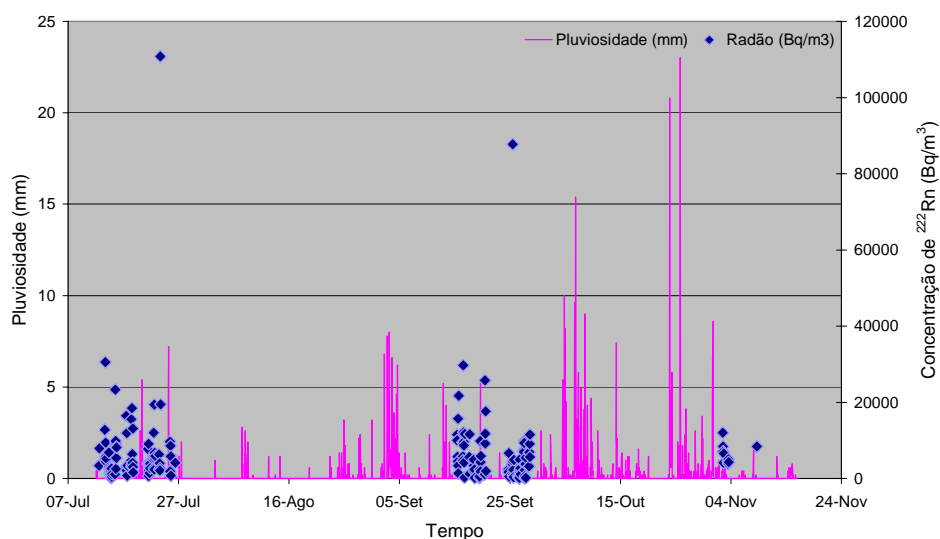


Figura 3.5 - Projeção dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da pluviosidade no período de amostragem.

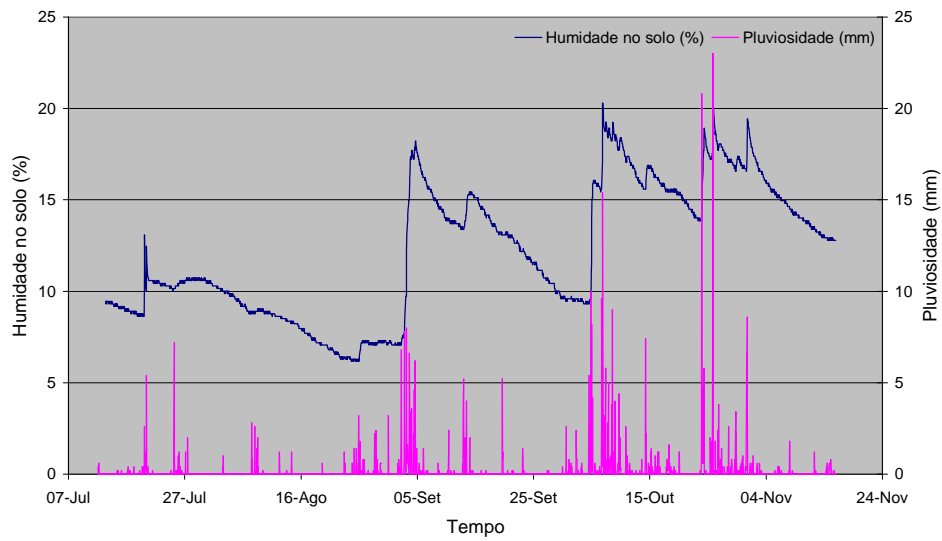


Figura 3.6 – Variação da umidade no solo e da pluviosidade ao longo do período de amostragem.

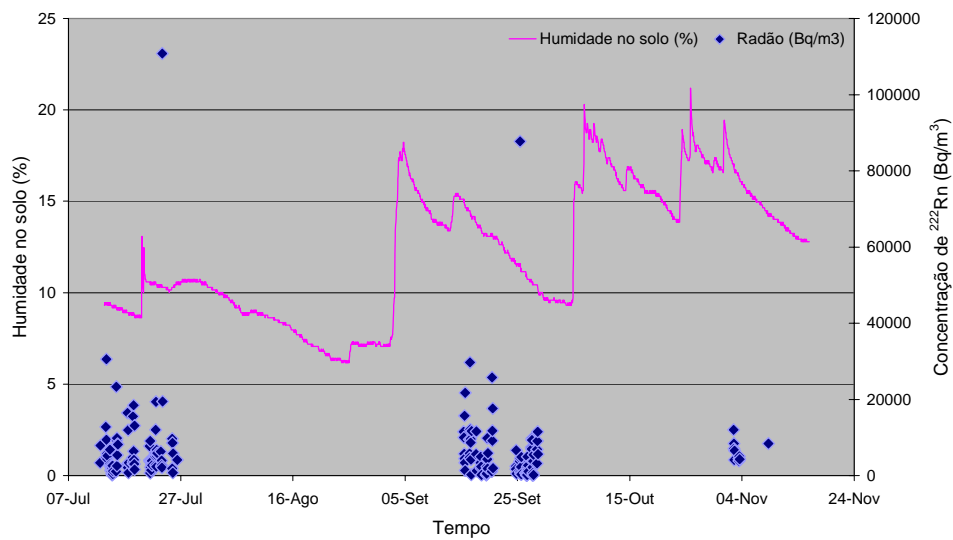


Figura 3.7 - Projecção dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da umidade no solo no período de amostragem.

Durante o período de amostragem verificam-se ligeiras oscilações nos valores da velocidade do vento (Fig. 3.8) e da humidade relativa do ar (Fig. 3.9). No entanto, tal como no caso da pressão barométrica, as variações destas variáveis são semelhantes, pelo que a sua influência no início e no final do período de amostragem

será sensivelmente a mesma não sendo possível imputar qualquer modificação nos valores de concentração de radão às variações destas variáveis meteorológicas.

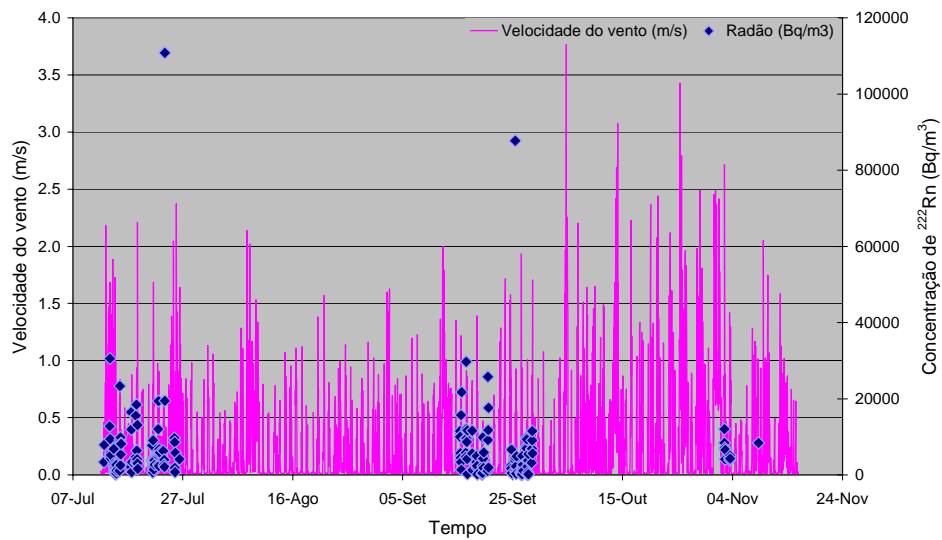


Figura 3.8 – Projecção dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da velocidade do vento no período de amostragem.

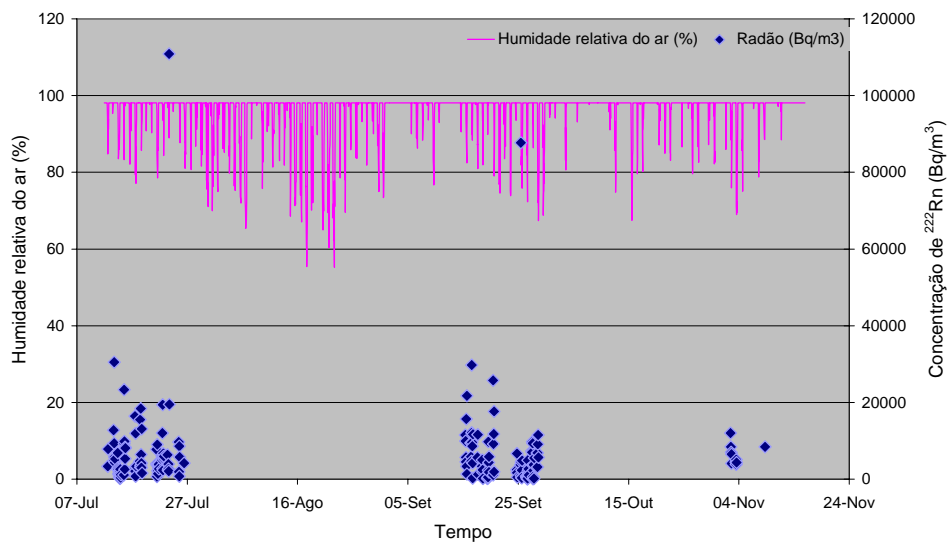


Figura 3.9 - Projecção dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e da humidade relativa do ar no período de amostragem.

Na figura 3.10 está representada a relação existente entre a concentração de radão e a temperatura do solo nos pontos amostrados. Nesta figura pode-se observar que não existe uma relação directa entre estes dois parâmetros, uma vez que para pontos cujos valores de temperatura são elevados (superiores a 30 °C) os valores de concentração de radão variam entre os valores mínimos e máximos obtidos nesta amostragem (45,9 e 110808 Bq/m<sup>3</sup>).

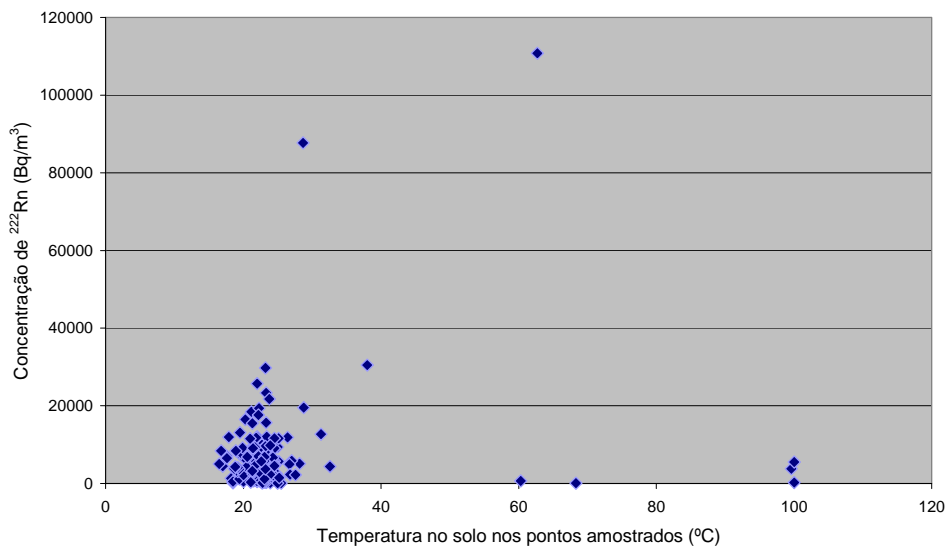


Figura 3.10 – Projecção da concentração de <sup>222</sup>Rn e da temperatura do solo nos pontos amostrados.

No que diz respeito aos valores da temperatura do solo, a sua variação ao longo das campanhas apresenta um ligeiro decréscimo nos pontos amostrados no mês de Novembro (Fig. 3.11). Este decréscimo também se verifica nos valores da temperatura do solo do sensor da estação de CO<sub>2</sub> e é consequência do decréscimo da temperatura do ar associado à própria variação sazonal (Fig. 3.12).

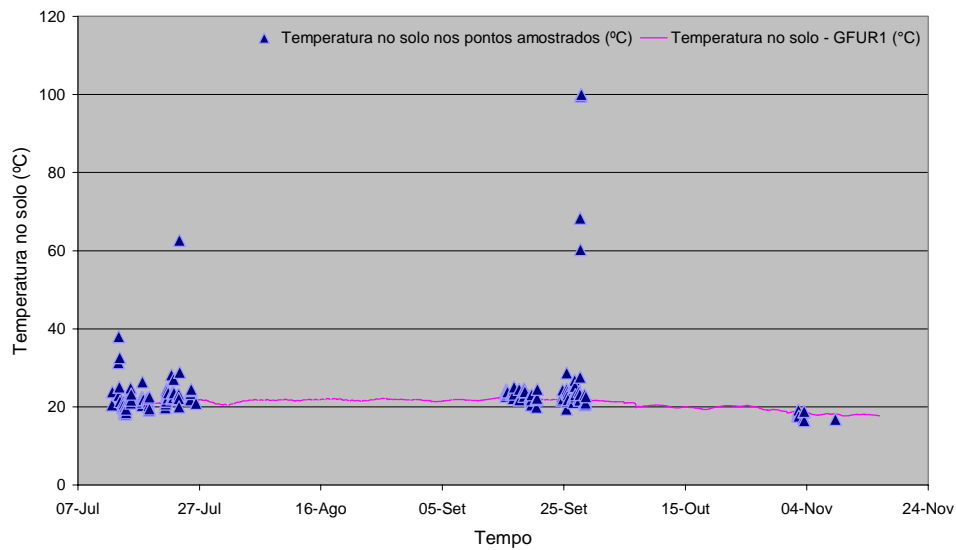


Figura 3.11 – Projecção dos valores da temperatura no solo nos pontos amostrados e da temperatura no solo medida pelo sensor adicional da estação fixa de fluxo de CO<sub>2</sub> (GFUR1) no período de amostragem.

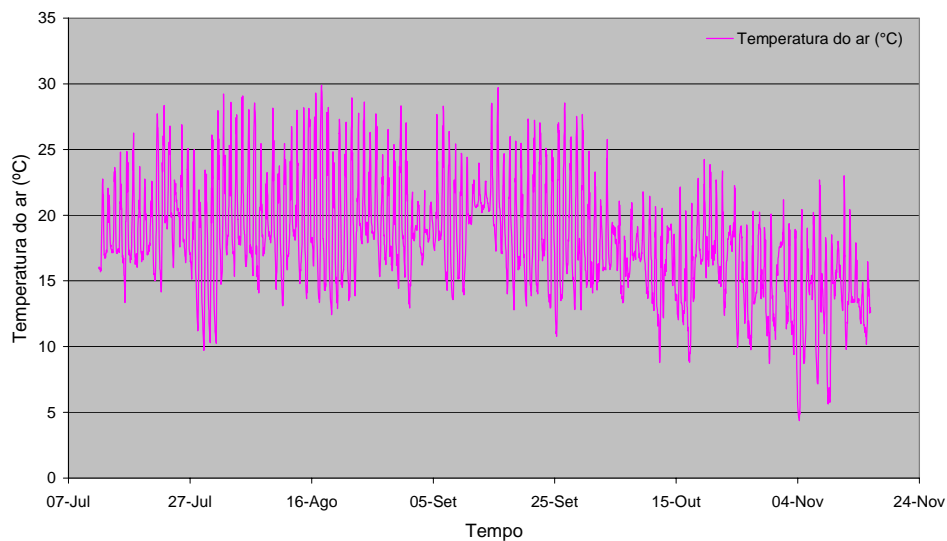


Figura 3.12 - Valores da temperatura do ar do sensor da estação fixa de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo.

Pelo exposto desta análise verifica-se que, por um lado, não é possível estabelecer relações entre as variáveis meteorológicas em análise e os valores de concentração de radão obtidos, uma vez que em cada ponto foi realizada apenas uma amostragem. Por outro lado, como as condições dos parâmetros meteorológicos se

mantiveram relativamente estáveis ao longo do período de amostragem, os valores de concentração de radão obtidos não sofreram influências significativas resultantes destes parâmetros e são considerados válidos para a cartografia apresentada no presente trabalho.

### **3.4.2. Distribuição Espacial da Concentração de $^{222}\text{Rn}$ e da Temperatura no Solo**

O conhecimento dos valores de concentração de radão no solo permite a análise da sua distribuição espacial tendo em vista a identificação de zonas de concentração de radão consideradas anómalas e a identificação de possíveis alinhamentos de desgaseificação. Assim sendo, são estes os principais objectivos desta análise.

Os valores de concentração de radão obtidos na realização da cartografia oscilaram entre os 45,9 e os 110808 Bq/m<sup>3</sup>. Estes valores enquadram-se nos intervalos de concentração deste gás obtidos noutras regiões vulcânicas (tabela 3.2).

A análise da distribuição espacial dos dados obtidos foi realizada com recurso a um Sistema de Informação Geográfica (SIG). No caso vertente o programa utilizado foi o Arcview (versão 3.3) da ESRI, com a extensão de análise espacial que permite a

Tabela 3.2 – Valores máximos e mínimos de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo obtidos em diversas regiões vulcânicas.

Vulcão	$^{222}\text{Rn}$ no solo ( $\text{Bq/m}^3$ )	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Arenal (Costa Rica) <sup>1</sup>	111 (média anual)	2331 (média anual)
Poás (Costa Rica) <sup>1</sup>	259 (média anual)	42550 (média anual)
Galeras (Colombia) <sup>2</sup>	222	56240
Cañadas Caldeira (Canárias) <sup>3</sup>	37	73630
Alban Hills Area (Itália) <sup>4</sup>	1480	367780

(<sup>1</sup>) Williams-Jones *et al.*, 2000  
 (<sup>2</sup>) Heiligmann *et al.*, 1997  
 (<sup>3</sup>) Hernández *et al.*, 2004  
 (<sup>4</sup>) Annunziatellis *et al.*, 2003

interpolação determinista conhecida como IDW (*Inverse Distance Weighted*). Neste método, a interpolação é efectuada através da análise dos pontos vizinhos. A ponderação de cada um destes pontos é consequência da sua distância ao ponto que está a ser estimado, ou seja, a influência de um ponto em relação a outro diminui com o aumento da distância ao ponto a estimar. Segundo Landim (2000), o IDW apresenta como principais vantagens: a) ser fácil de entender matematicamente; b) possuir um algoritmo bem conhecido e discutido; c) estar disponível em muitos *softwares*; d) utilizar pouco tempo de computação; e) não estimar valores de  $Z_i$  (valor/resíduo do ponto vizinho amostrado ao ponto a estimar) maiores ou menores do que os valores máximos e mínimos dos dados, pelo que é eficaz na determinação de espessura, concentração química e propriedades físicas; f) ser muito eficaz na análise de variações (anomalias) entre dados irregularmente distribuídos e g) ser um bom estimador para propósitos gerais.

Nesta interpolação o tamanho da célula utilizado foi de aproximadamente 7,7 metros, dimensão otimizada pelo *software* usado, sendo 6 o número de pontos vizinhos utilizados.

Para a definição do valor considerado como limite para o ruído de fundo relativo aos dados obtidos, foi aplicada a metodologia que tem sido amplamente utilizada na definição de anomalias geoquímicas resultantes de desgaseificação difusa (e.g. Chiodini *et al.*, 1998; Cardellini *et al.*, 2003; Hernández *et al.*, 2004) a qual tem em consideração a distribuição estatística dos dados da concentração de radão no solo.

O tratamento estatístico de toda a informação recolhida foi efectuado com base nas aplicações disponibilizadas pelo *software* SPSS (*Statistical Packages for the Social Sciences*), versão 14.0.

Um dos critérios utilizados para a aplicação de metodologias estatísticas consiste no facto de ser necessário que os dados sigam uma distribuição normal. No caso presente, construiu-se o histograma dos valores da concentração de radão e verificou-se que os mesmos não apresentam uma distribuição normal (Fig. 3.13-a). Nestas circunstâncias recorreu-se à conversão dos dados numa escala logarítmica verificando-se que a distribuição dos dados convertidos se aproxima da normalidade (Fig. 3.13-b).

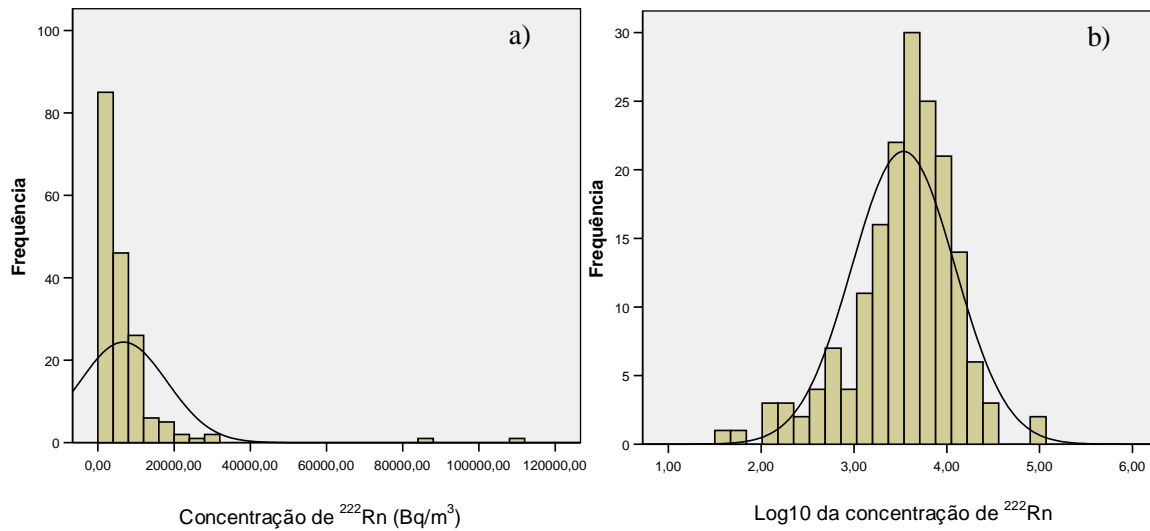


Figura 3.13 – a) Histograma dos dados da concentração de radão b) Histograma dos dados da concentração de radão convertidos numa escala logarítmica.

Os dados log-transformados foram projectados com recurso ao *software Grapher* versão 2,0, no gráfico de frequências acumuladas permitindo assim a definição de diferentes populações geoquímicas através da mudança de declive dos pontos projectados (Landim, 2003). Com base nesta metodologia foi possível definir duas populações distintas: a população A que compreende todos os dados até ao ponto de inflexão situado nos 3.3 (2000 Bq/m<sup>3</sup>) e corresponde aos valores de ruído de fundo e a população B que representa os restantes valores (Fig. 3.14). Em resultado estabelecem-se como valores anómalos de concentração de radão no solo os valores superiores a 2000 Bq/m<sup>3</sup>.

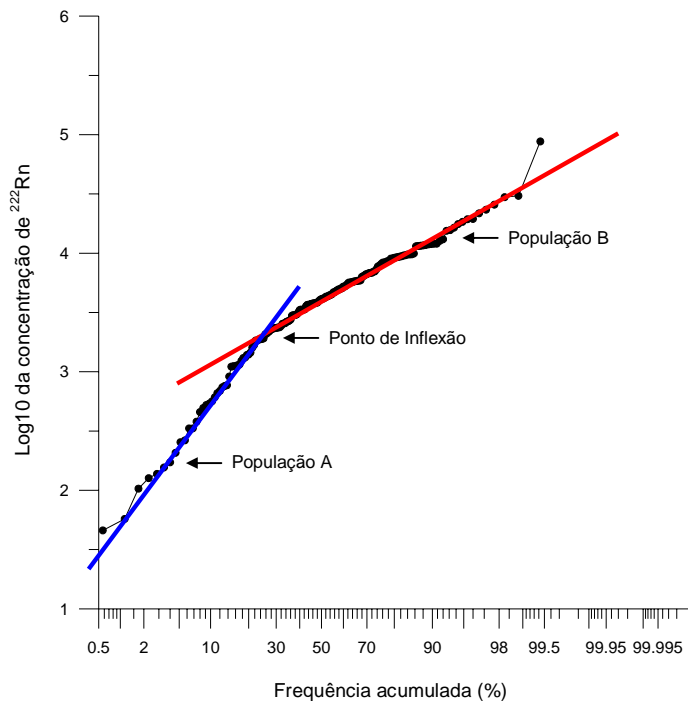


Figura 3.14 – Gráfico de frequências acumuladas da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo.

Para a representação espacial das zonas anómalas foram ensaiadas várias tentativas no sentido de se definirem um conjunto de classes de valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  que melhor traduzissem as observações realizadas no campo, a primeira das quais contém todos os valores de ruído de fundo ( $2000 \text{ Bq/m}^3$ ).

A cartografia resultante da aplicação da metodologia anteriormente descrita é apresentada na Fig. 3.15.

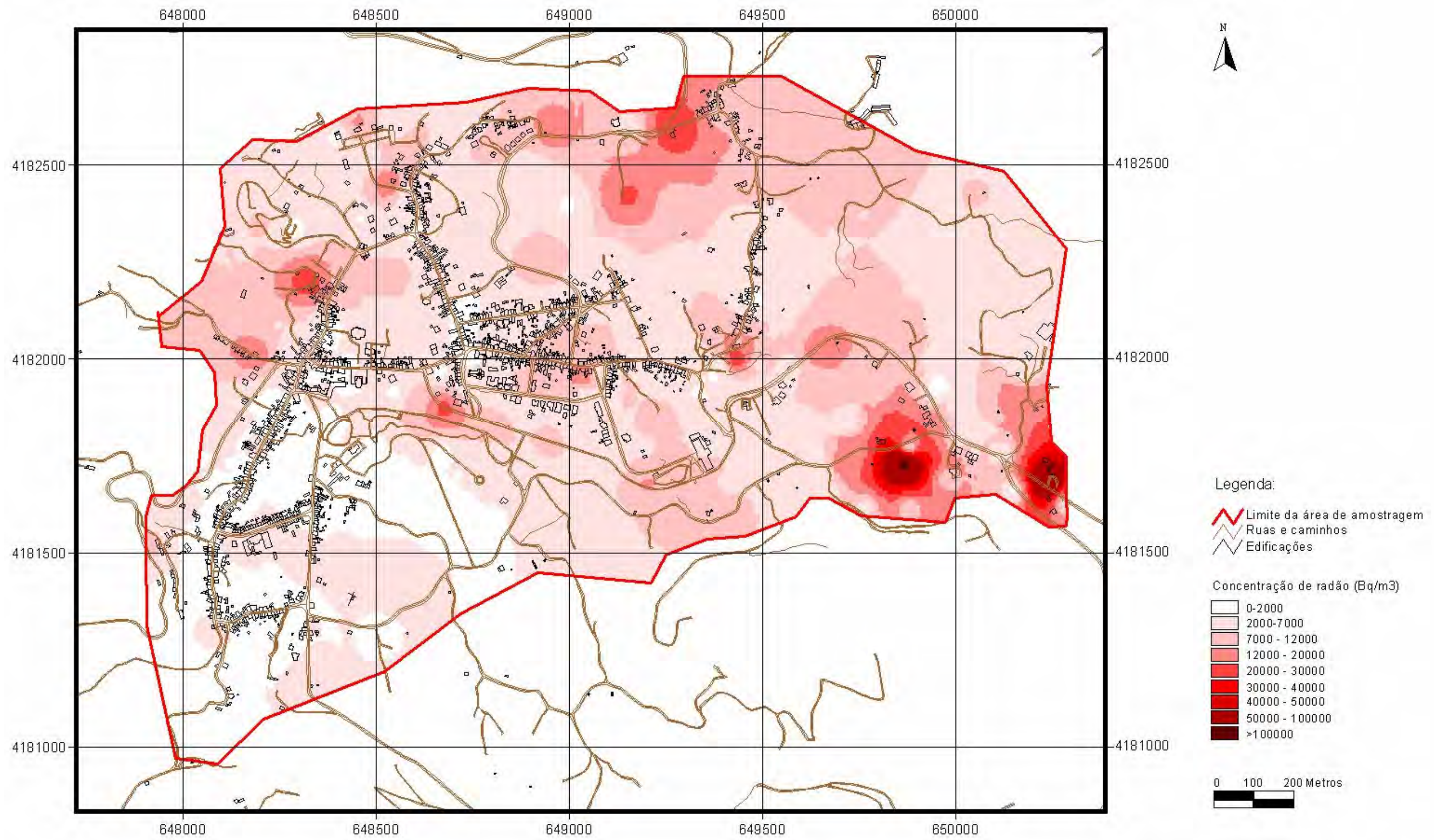


Figura 3.15 – Distribuição espacial da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo.

Com base na distribuição espacial dos valores de concentração amostrados foram definidas 14 zonas anómalas. Estas zonas apresentam normalmente valores de concentração igual ou superior a  $12000 \text{ Bq/m}^3$ , uma vez que é a partir deste valor que as zonas anómalas apresentam uma melhor definição. A cada uma delas foi atribuída uma designação alfanumérica (Fig. 3.16). Assim, foram identificadas as anomalias que se listam (tabela 3.3):

Tabela 3.3 – Designação das zonas de concentração anómala de  $^{222}\text{Rn}$ .

<b>Designação alfanumérica</b>	<b>Designação das zonas de concentração anómala de radão</b>
R1	Anomalia da Serra do Trigo
R2	Anomalia dos Tambores, junto ao sopé do Pico das Caldeiras
R3	Anomalia dos Tambores, junto à Estrada Regional Furnas - Povoação
R4	Anomalia do Jardim das Caldeiras das Furnas
R5	Anomalia do Jardim das Termas
R6	Anomalia da Rua Dr. Frederico Pereira
R7	Anomalia da Av. Dr. Manuel de Arriaga, junto ao cruzamento com a Rua Padre Jacinto Botelho
R8	Anomalia da Canada Dr. Freire
R9	Anomalia junto ao campo de futebol
R10	Anomalia do Viveiro da Florestal 1
R11	Anomalia do Viveiro da Florestal 2
R12	Anomalia do Rebentão das Pimentas 1
R13	Anomalia do Rebentão das Pimentas 2
R14	Anomalia a Oeste do Estaleiro

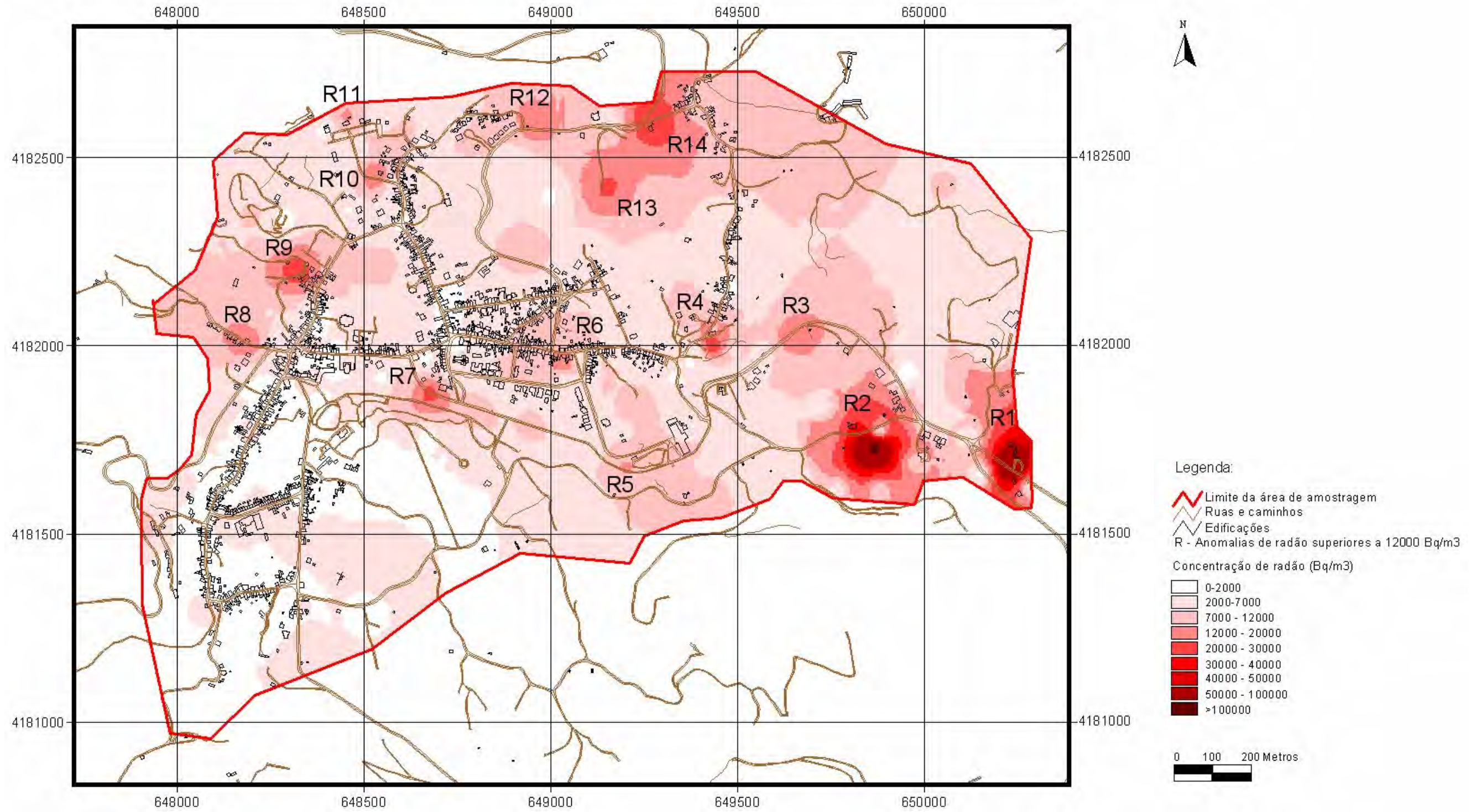


Figura 3.16 – Distribuição espacial da concentração de <sup>222</sup>Rn no solo. Localização das zonas anómalas.

O padrão de distribuição das anomalias de radão não difere significativamente dos padrões de distribuição de concentração de CO<sub>2</sub> no solo, determinados em estudos anteriores (e.g. Sousa, 2003), cuja área de amostragem foi sensivelmente idêntica à do presente trabalho (Fig. 3.17)

O valor de concentração de radão mais elevado (110808 Bq/m<sup>3</sup>) foi obtido na zona da anomalia R2. Esta é igualmente uma importante zona anómala em termos de CO<sub>2</sub> e de temperatura facto que explica a razão pela qual a vegetação não se desenvolve ou não sobrevive neste local (Foto 3.5).



Fotografia 3.5 – Local de amostragem de maior concentração de <sup>222</sup>Rn. Zona de anomalia R2, anomalia dos Tambores, junto ao sopé do Pico das Caldeiras.

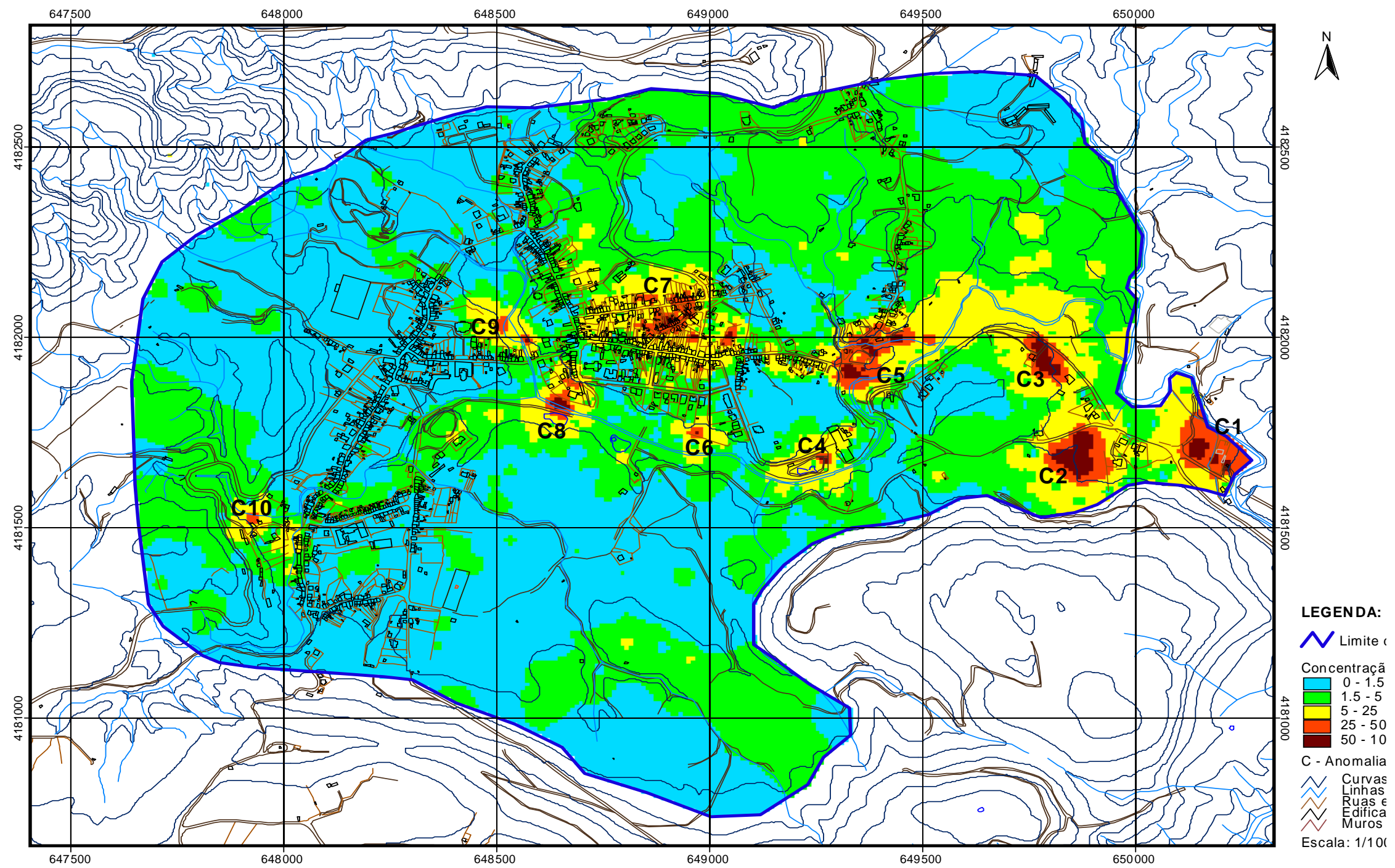


Figura 3.17 – Distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> no solo (in Sousa, 2003).

Através da análise comparativa entre as zonas de desgaseificação anómala de  $^{222}\text{Rn}$  e de  $\text{CO}_2$  é possível identificar zonas comuns, que se listam na tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Zonas de desgaseificação anómalas comuns ao  $^{222}\text{Rn}$  e ao  $\text{CO}_2$ .

Anomalia de $^{222}\text{Rn}$	Anomalia de $\text{CO}_2$	Designação das zonas anómalas
R1	C1	Anomalia da Serra do Trigo
R2	C2	Anomalia dos Tambores, junto ao sopé do Pico das Caldeiras
R3	C3	Anomalia dos Tambores, junto à Estrada Regional Furnas - Povoação
R4	C5	Anomalia do Jardim das Caldeiras das Furnas
R5	C4	Anomalia do Jardim das Termas
R6	C7	Anomalia da Rua Dr. Frederico Pereira
R7	C8	Anomalia da Av. Dr. Manuel de Arriaga, junto ao cruzamento com a Rua Padre Jacinto Botelho

Esta associação sugere que tais anomalias devam estar relacionadas com a dinâmica associada ao sistema hidrotermal e com a ascensão destes gases através de zonas de maior fraqueza. Nesta situação o dióxido de carbono pode funcionar como gás de arraste em relação ao radão, como frequentemente é sugerido (e.g. Etiope e Martinelli, 2002).

Existem ainda, algumas zonas de anomalia de radão como R12, R13 e R14 que coincidem com valores de baixa concentração de  $\text{CO}_2$ , entre os 1,5 e os 5 %vol. e as zonas R8, R9, R10 e R11 em que os valores de concentração de  $\text{CO}_2$  correspondem a valores de ruído de fundo (<1,5 %vol.). Inversamente, existem zonas de anomalias de  $\text{CO}_2$  que não se encontram associadas à presença de radão (C9 e C10), ou que este quando presente, surge em concentrações baixas (C6) ou ocupa uma área muito pequena quando comparativamente à anomalia de  $\text{CO}_2$  (C5).

A presença de zonas anómalas exclusivamente de  $^{222}\text{Rn}$  (R8, R9, R10 e R11) terá que ser explicada pelo transporte deste isótopo por outro gás de arraste que não o  $\text{CO}_2$ , pela acção da água ou ainda por qualquer outro factor.

A reduzida área anómala de radão (R4) no campo fumarólico da Freguesia das Furnas quando comparada com a expressa na anomalia de  $\text{CO}_2$  (C5) poderá ser atribuída ao favorecimento da dissolução do urânio por acção de águas subterrâneas remobilizando-o deste local. Eventualmente e se as condições geoquímicas o permitirem, o ião formado ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) poderá ser posteriormente depositado noutra local ao ligar-se ao ião  $\text{CO}_3^{2-}$  originando uma forma insolúvel de carbonato de urânio, tal como acontece, por exemplo, na Hungria (Tóth *et al.*, 1997).

Na zona de concentração anómala de  $\text{CO}_2$  C10 (Poça da Beija) não foram encontradas condições propícias à realização da amostragem uma vez que neste terreno a humidade no solo é muito elevada.

No que concerne à cartografia de anomalias térmicas (Fig. 3.18), não foram utilizados os mesmos intervalos de valores definidos por Sousa (2003), já que por um lado, o período de amostragem foi diferente, e por outro, torna-se necessário fazer uma correcção dos valores obtidos. Para a definição do ruído de fundo recorreu-se aos valores de temperatura do solo e do ar registados pela estação GFUR1, uma que neste ponto estes valores não parecem ser afectados por temperaturas anómalas podendo ser utilizados como linha de base para a identificação de zonas com

anomalias térmicas. Assim, considerou-se, por um lado, os 23 °C como o valor a partir do qual a temperatura do solo poderá ser considerada anómala, já que este foi o valor máximo da temperatura do solo registado durante o período de amostragem, e por outro, os 30 °C como o valor a partir do qual a temperatura do solo é seguramente anómala uma vez que este valor corresponde à temperatura máxima do ar e consequentemente à influência máxima que esta poderia exercer sobre a temperatura do solo em determinado ponto.

À semelhança da metodologia aplicada na designação atribuída às zonas de anomalias de concentração de radão, também a designação aplicada a zonas de anomalia térmica é alfanumérica (Fig. 3.19). Foram identificadas as zonas anómalas que se seguem (tabela 3.5):

Tabela 3.5 – Designação das zonas de anomalia térmica.

<b>Designação alfanumérica</b>	<b>Designação das zonas de anomalia térmica</b>
T1	Anomalia dos Tambores, junto ao sopé do Pico das Caldeiras
T2	Anomalia das Caldeiras das Furnas
T3	Anomalia do Jardim das Termas

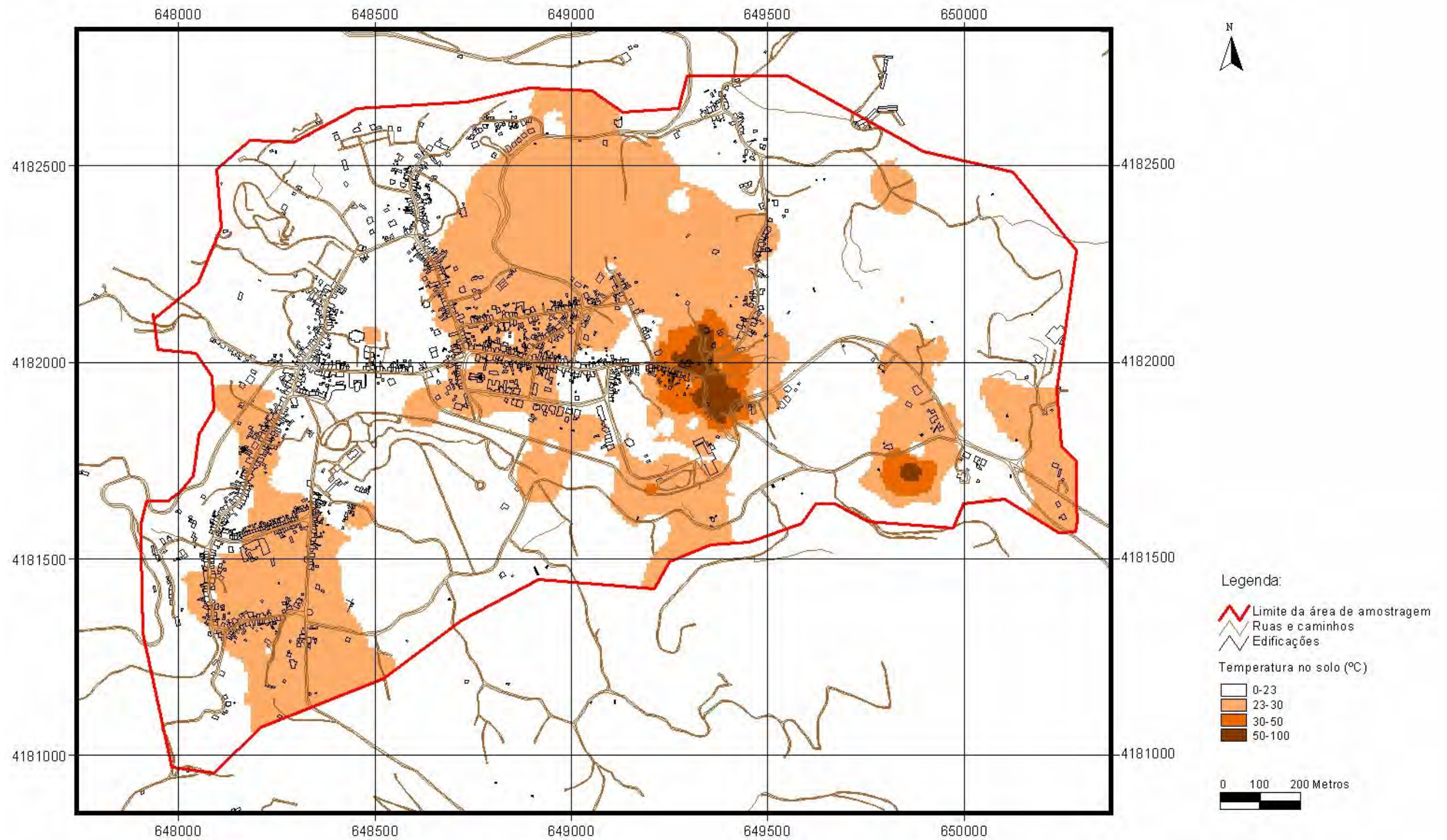


Figura 3.18 – Distribuição espacial da temperatura no solo.

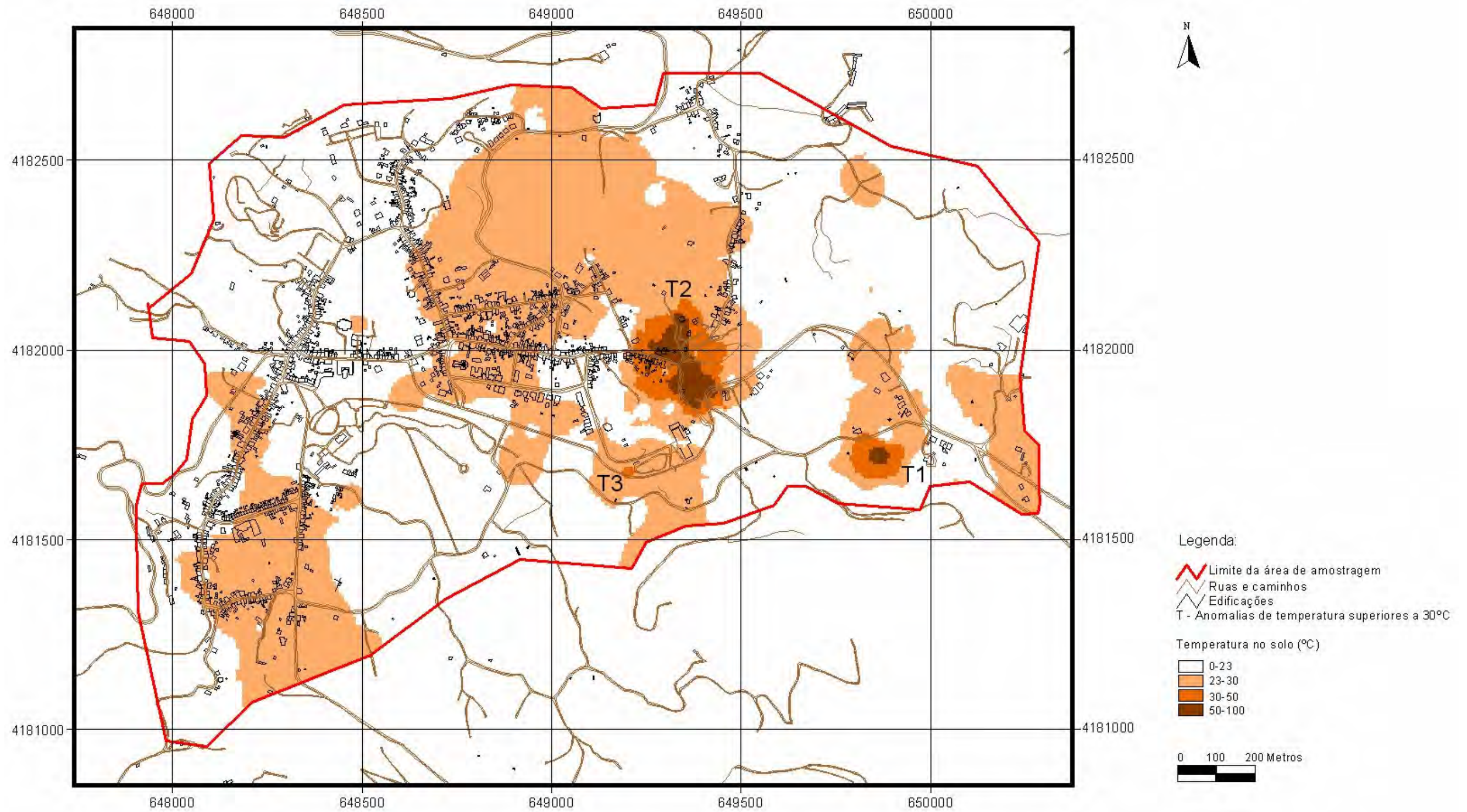


Figura 3.19 - Distribuição espacial da temperatura do solo. Localização das zonas anômalas.

A análise comparativa da cartografia de anomalias térmicas do presente trabalho e a cartografia apresentada em 2003 por Sousa (Fig. 3.20) permite identificar zonas anómalas comuns, nomeadamente as apresentadas na tabela 3.6:

Tabela 3.6 – Anomalias térmicas definidas neste trabalho comuns às definidas por Sousa (2003).

Anomalia térmica definida no presente trabalho	Anomalia térmica definida por Sousa (2003)	Designação das zonas anómalas
T1	T2	Anomalia dos Tambores, junto ao sopé do Pico das Caldeiras
T2	T5	Anomalia das Caldeiras das Furnas
T3	T4	Anomalia do Jardim das Termas

Existem ainda zonas de anomalia térmica apresentadas em 2003, como sejam as anomalias T1, T3 e T6 que na cartografia aqui apresentada correspondem a valores de temperatura inferiores, podendo este facto dever-se aos diferentes critérios e/ou malhas utilizados. Por outro lado, a área de anomalia térmica neste trabalho é superior à apresentada por Sousa (2003). Esta diferença pode ser consequência da correcção anual que foi efectuada e que apresenta uma diferença de  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) em relação à temperatura máxima no solo obtida em 2003 ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) o que se reflecte nas escalas utilizadas nas duas cartografias apresentadas.

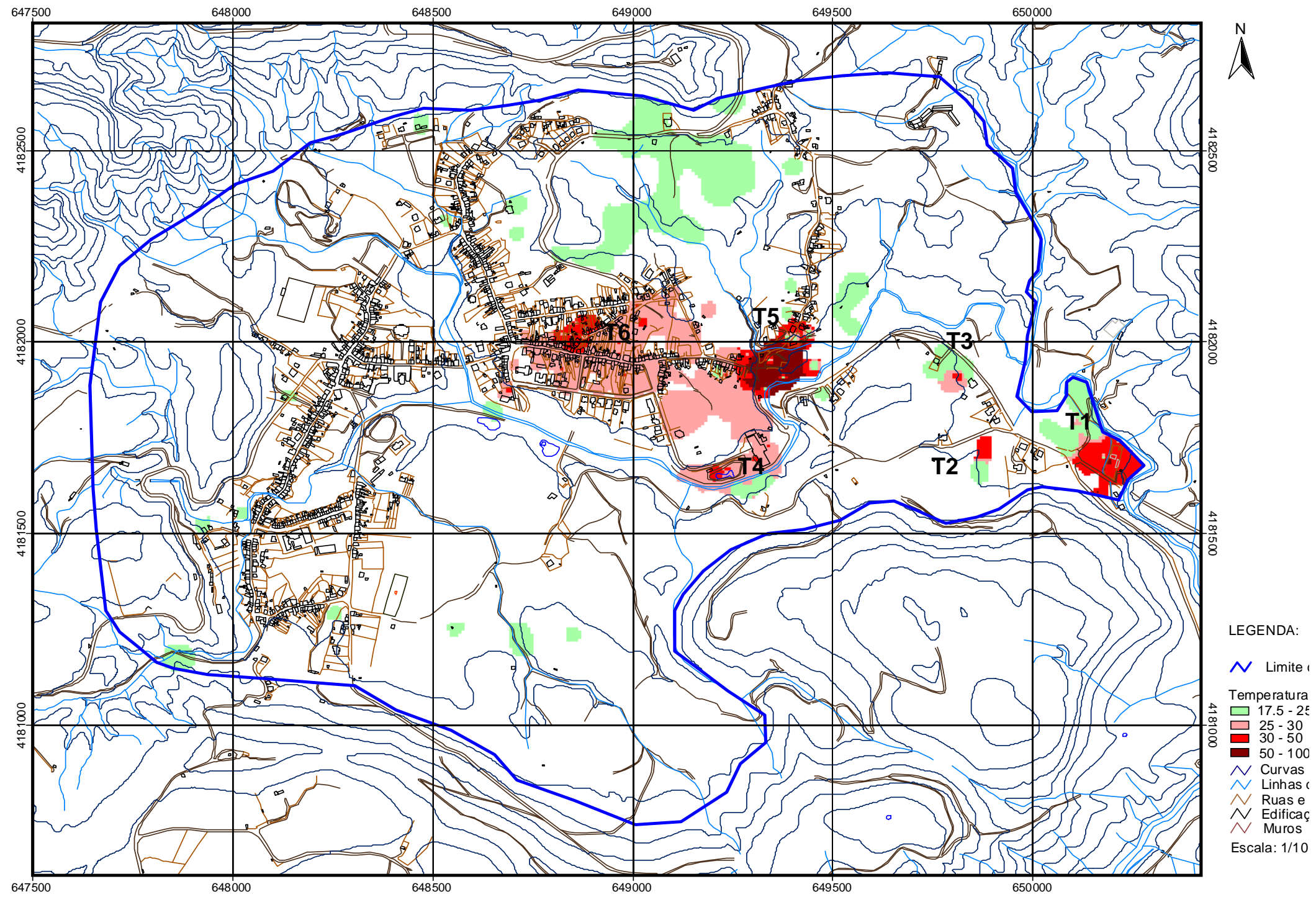


Figura 3.20 – Distribuição da anomalia térmica (adaptado de Sousa, 2003).

### 3.4.3. Análise dos Resultados

A análise da distribuição espacial da concentração de radão no solo permite ainda traçar alguns alinhamentos de direcção E-W, NE-SW e E-W a WNW-ESE (Fig. 3.21).

A direcção aproximadamente E-W está representada pelos alinhamentos A1 e A2 que contemplam as anomalias R1, R2 e as anomalias R3, R4 e R6, respectivamente. Os alinhamentos A3 e A4, de orientação NE-SW, contemplam respectivamente as anomalias R8, R9 e R10 e as anomalias R7, R13 e R14. Por fim a direcção E-W a WNW-ESE está representada pelo alinhamento A5 e inclui as anomalias R5, R7 e R8. Alguns destes alinhamentos aproximam-se dos traçados por Sousa em 2003 (Fig. 3.22).

Com o auxílio da fotografia aérea e através da sobreposição dos alinhamentos definidos sobre o modelo digital de terreno da área amostrada (Fig. 3.23) é possível observar que os alinhamentos A1, A2 e uma parte de A5 correspondem a zonas deprimidas associadas a linhas de água, enquanto os alinhamentos A3 e A4 não parecem associados a qualquer tipo de estrutura geomorfológica.

Por outro lado, os alinhamentos definidos pelas anomalias de radão apresentam direcções similares às indicadas em trabalhos anteriores. É o caso de alguns acidentes tectónicos cartografados por Gaspar *et al.* (1995) (Fig. 3.24) e de

algumas orientações da anomalia de *Bouguer* definidas por Montesinos *et al.* (1999) (Fig. 3.25).

Embora a área de trabalho seja relativamente reduzida quando comparada com a área total da caldeira do Vulcão das Furnas, tal como se pode observar na figura 3.24, não se pode excluir que alguma destas zonas anómalas esteja associada a estruturas circulares, nomeadamente à cratera da erupção Furnas C como é o caso possível das anomalias R4, R8 e R9, e/ou ao bordo da caldeira interna, como parecem sugerir as anomalias R10, R11, R12 e R14.

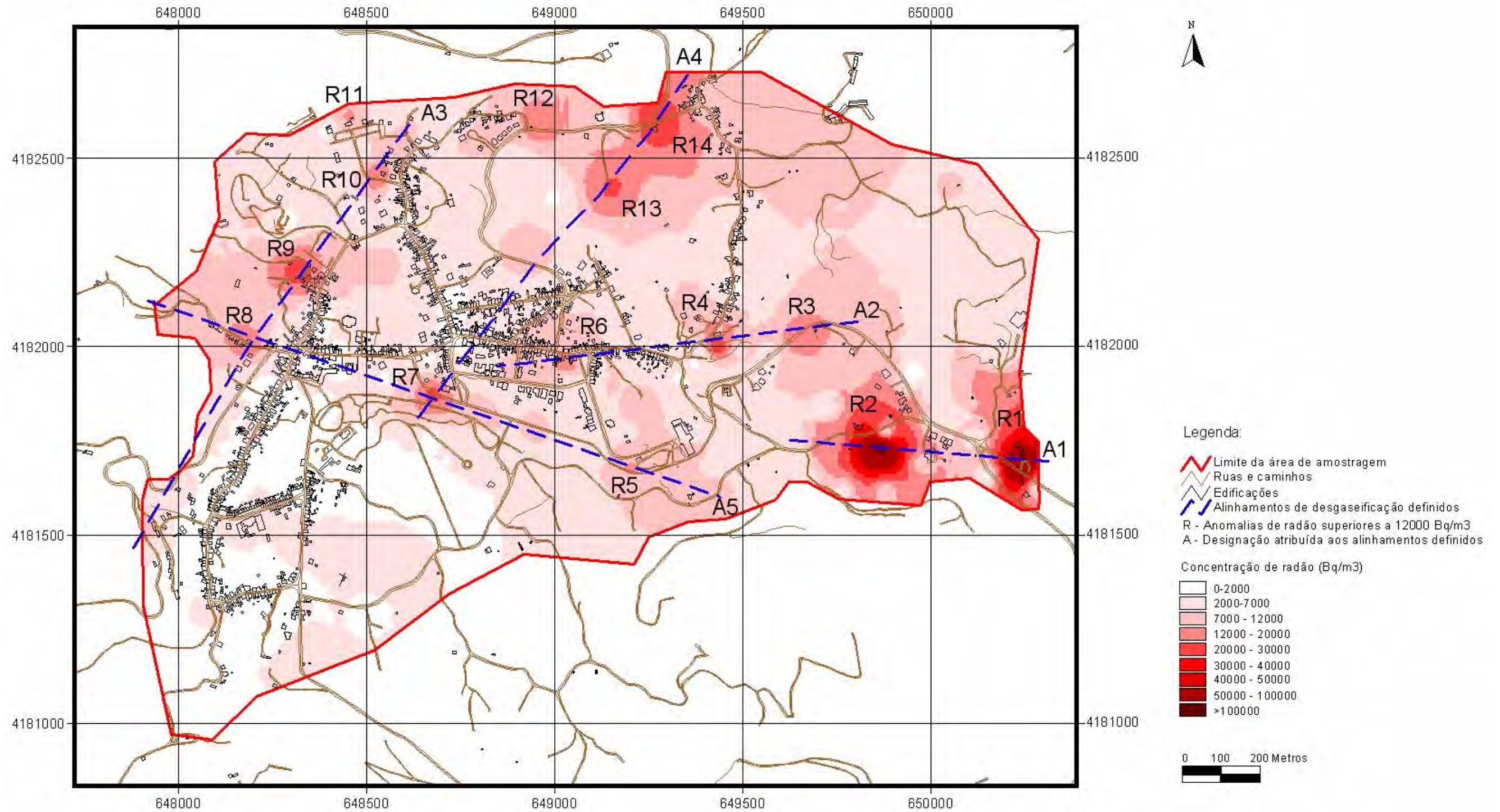
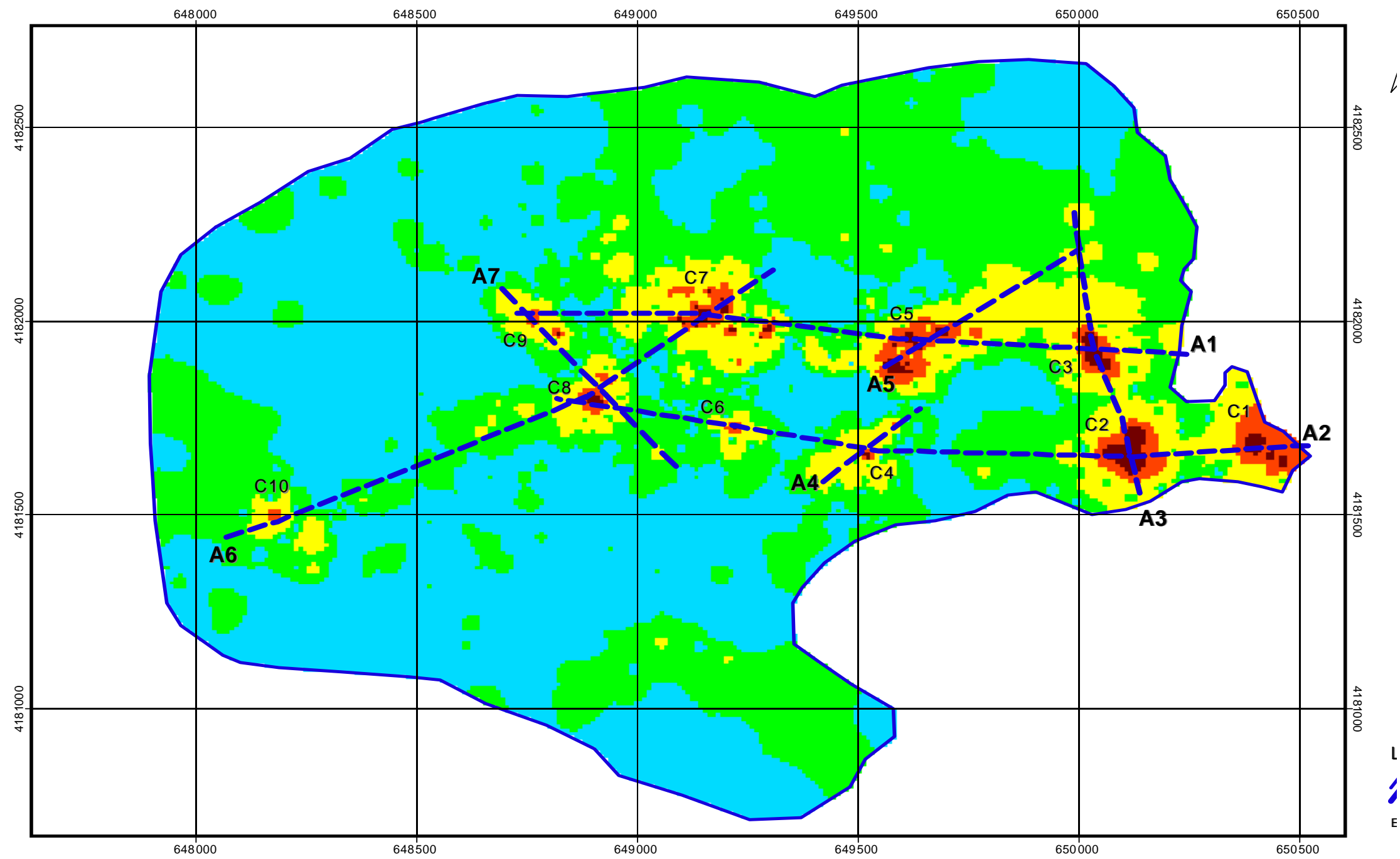


Figura 3.21 - Alinhamentos traçados pelas anomalias de <sup>222</sup>Rn presentes na área amostrada.

Figura 3.22 - Alinhamentos definidos pelas anomalias de CO<sub>2</sub> (in Sousa 2003).

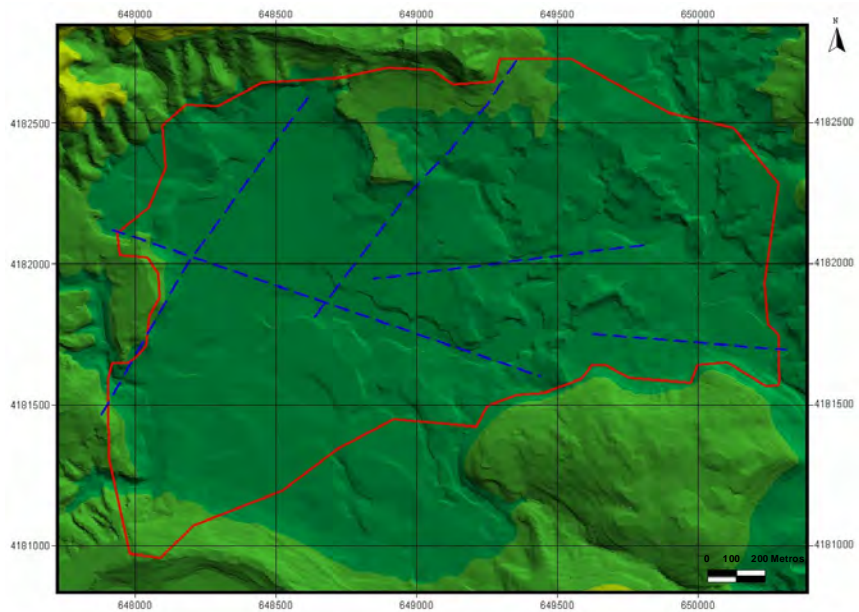


Figura 3.23 - Alinhamentos traçados de acordo com as anomalias de  $^{222}\text{Rn}$  sobrepostos no modelo digital de terreno da área amostrada.

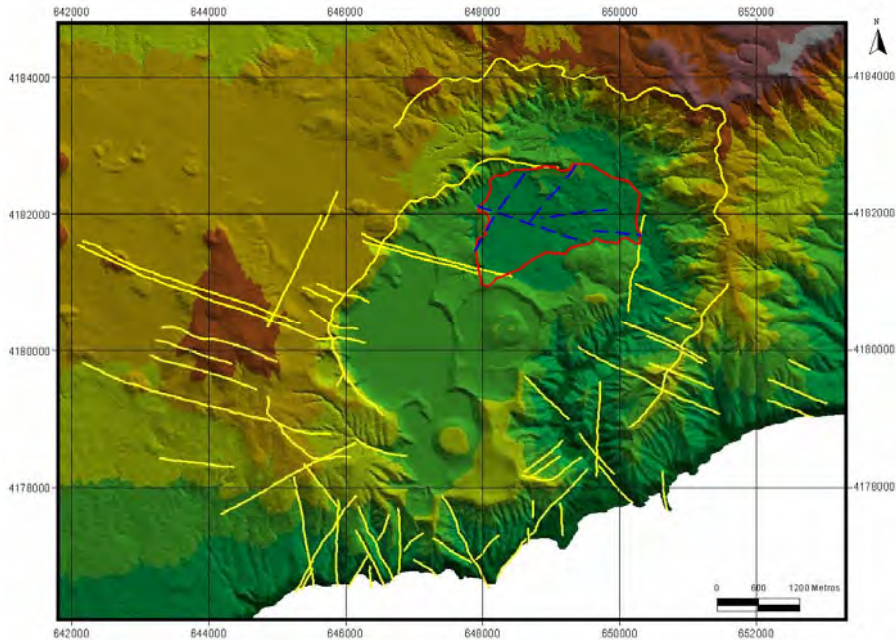


Figura 3.24 – Sobreposição de falhas (Gaspar *et al.*, 1995) e alinhamentos traçados neste trabalho no modelo digital de terreno. Legenda: — Falhas definidas por Gaspar *et al.* (1995); - - Alinhamentos traçados; — Limite da área de estudo.

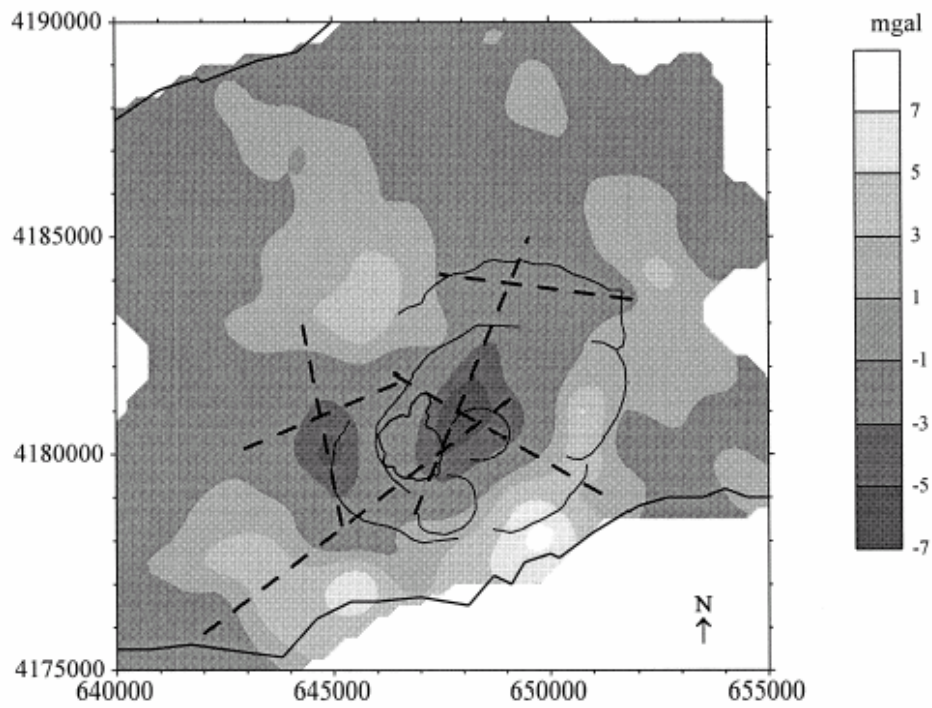


Figura 3.25 - Modelo final da anomalia local de *Bouguer* (in Montesinos *et al.*, 1999). As linhas a tracejado representam os alinhamentos das áreas de baixa densidade.

## 4. MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO

### 4.1. Nota Prévia

A amostragem contínua de radão no solo pode constituir uma importante fonte de informação acerca de fenómenos que ocorrem em profundidade. As anomalias de radão podem anteceder, acompanhar ou proceder a ocorrência de eventos sísmicos uma vez que as variações de pressão/tensão associadas a estes fenómenos criam as condições propícias à libertação do radão das rochas e ao seu transporte através dos fluidos existentes nos espaços intersticiais. Por outro lado, anomalias deste gás têm também sido associadas a intrusões magmáticas, quer como consequência da fracturação associada a este fenómeno quer devido ao aumento da temperatura em profundidade (Cox, 1980).

Para o ensaio de monitorização contínua de  $^{222}\text{Rn}$  no Vulcão das Furnas, o mesmo equipamento utilizado para a cartografia de  $^{222}\text{Rn}$  foi instalado temporariamente no jardim do Centro Termal das Furnas num ponto adjacente à estação de fluxo de  $\text{CO}_2$  (GFUR1). Deste modo, os parâmetros meteorológicos e dados recolhidos por esta estação foram utilizados para a interpretação das variações de  $^{222}\text{Rn}$  registadas, no sentido de se compreender o comportamento do  $^{222}\text{Rn}$  no solo.

## 4.2. Metodologia

### 4.2.1. Equipamento

Na utilização do detector de  $^{222}\text{Rn}$  como estação de monitorização permanente este é configurado no modo *Normal* uma vez que as duas janelas de energia de radiação  $\alpha$  (A e C) são utilizadas no cálculo da concentração de radão, aumentando assim a precisão da medição. No caso vertente, optou-se pelo modo *Auto*, em que a amostragem é iniciada em modo *Sniff* e passa automaticamente a modo *Normal*, 3 horas após o início da amostragem. Este modo de operação permite que todos os dados possam ser utilizados desde o início da amostragem, beneficiando-se da maior precisão fornecida pelo modo *Normal*.

Para a amostragem da concentração de radão no solo foram ainda utilizados:

- (a) Sonda de ferro com 1,27 m de comprimento e um adaptador em T (*T-handle*);
- (b) Tubos de silicone e conectores;
- (c) Unidade dessecante (*laboratory drying unit - Drierite*);
- (d) Filtros 0,45 microns (*inlet*);
- (e) Luvas de jardineiro;
- (f) Extensão eléctrica.

### 4.2.2. Amostragem

O ensaio de monitorização contínua de radão no solo decorreu num período de 4 meses, compreendido entre 18 de Agosto e 17 de Dezembro de 2005. A primeira fase do processo de instalação da estação fixa de radão correspondeu precisamente à fase de selecção do local apropriado para a sua instalação. Nesta selecção foram tidos em conta factores como a segurança do equipamento, o fornecimento de energia e protecção contra os factores meteorológicos. Assim optou-se por colocar a estação de radão no mesmo abrigo da estação fixa de fluxo de CO<sub>2</sub> (GFUR1) (Fig. 4.1 e Foto 4.1).

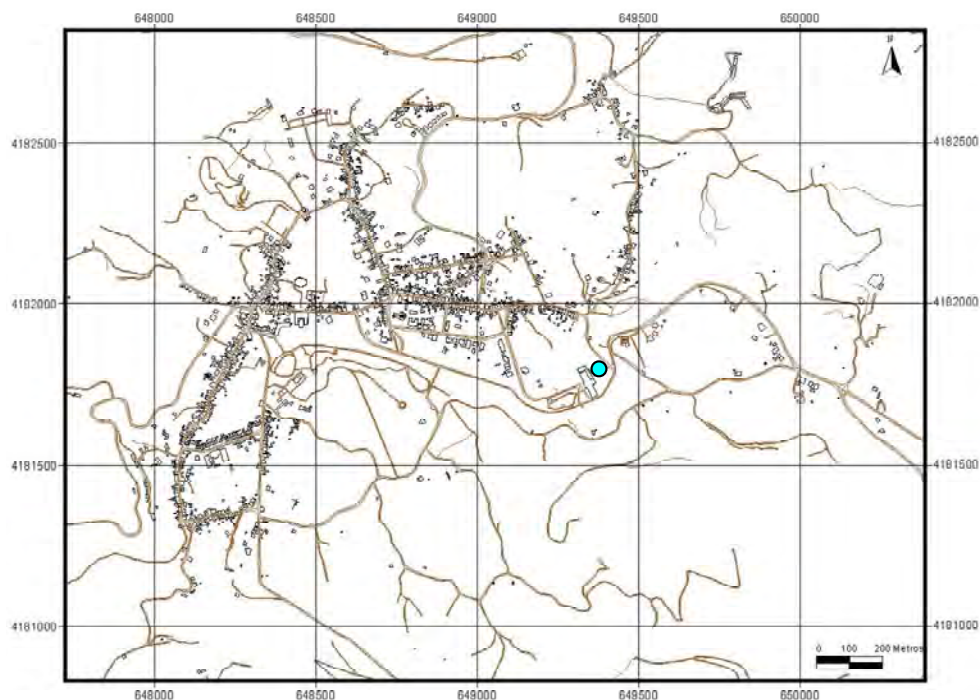


Figura 4.1 - Localização da estação de <sup>222</sup>Rn instalada temporariamente no jardim do Centro Termal da Fumal. Legenda: ● Local de instalação.



Fotografia 4.1 – O RAD7 e a unidade dessecante foram colocados na casa de protecção da estação de fluxo (GFUR1).

Para a montagem da estação de radão procedeu-se à introdução da sonda de amostragem no solo a uma profundidade de aproximadamente 80 cm com o auxílio do adaptador em T. O adaptador foi retirado assim como a vara existente no interior da sonda. A alimentação de energia ao equipamento foi fornecida directamente pela instalação eléctrica do Centro Termal das Furnas. Também o sistema de introdução da amostra foi idêntico ao já referido anteriormente (ver ponto 3.2.2).

Cada medição em modo *Auto* correspondeu, neste caso, a um ciclo de 60 minutos. Em cada início de ciclo de amostragem a aspiração da amostra foi efectuada durante os primeiros 5 minutos após os quais a aspiração passou a ser efectuada num minuto em cada 5. A contagem decorreu ao longo dos 60 minutos e o valor final

corresponde à média dos decaimentos de partículas  $\alpha$  por segundo por metro cúbico de ar amostrado. Assim, foram contabilizadas nas primeiras três horas de amostragem as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do  $^{218}\text{Po}$  (janela A) e a partir da terceira hora foram contabilizadas as partículas  $\alpha$  resultantes do decaimento do  $^{218}\text{Po}$  (janela A) e as do  $^{214}\text{Po}$  (janela C).

### **4.2.3. Recolha e Tratamento de Dados**

De acordo com a capacidade de armazenamento do equipamento os dados foram recolhidos uma vez por mês. A qualidade/validade dos dados obtidos foi analisada em função da percentagem de humidade no detector. Todos os valores associados a teores de humidade superiores a 10% devem ser excluídos. À semelhança do tratamento efectuado aos dados da cartografia de radão, estes foram convertidos em ficheiros *Microsoft Excel*. A este conjunto de informação foi adicionada toda a informação ambiental e de fluxo de  $\text{CO}_2$  adquirida pela estação GFUR1.

### 4.3. Apresentação dos Resultados

O ensaio de monitorização contínua de radão no solo decorreu, tal como referido anteriormente, entre 18 de Agosto e 17 de Dezembro de 2005. Os valores obtidos podem ser consultados em formato digital no anexo II e oscilam entre os 0 e os 35308,28 Bq/m<sup>3</sup> (tabela 4.1).

Tabela 4.1– Valor máximo, mínimo e médio da concentração de <sup>222</sup>Rn na estação permanente.

Concentração de <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	
Valor Máximo	35308,28
Valor Mínimo	0,00
Valor Médio	17905,71

A representação gráfica da distribuição temporal da concentração de <sup>222</sup>Rn no solo pode ser observada na figura 4.2. A ausência de dados verificada no período de 21 de Setembro a 2 de Outubro é resultante de problemas ocorridos durante a transferência de dados. Verificam-se alguns períodos em que os valores obtidos são iguais ou muito próximos de 0, o que poderá estar relacionado com problemas de ordem técnica no funcionamento do detector. Durante o período de amostragem todos os valores de humidade no interior do detector foram inferiores a 10 % pelo que todos os valores de concentração de radão obtidos são válidos.

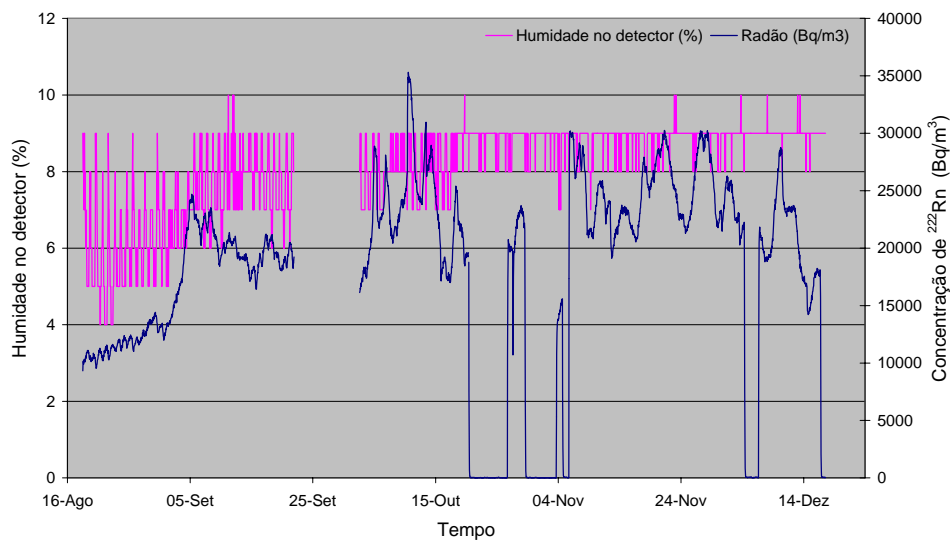


Figura 4.2 – Relação entre a variação temporal da concentração de <sup>222</sup>Rn no solo e a humidade no interior do detector.

#### 4.4. Discussão

Sabendo que os factores meteorológicos exercem influência na concentração de radão no solo, a abordagem mais adequada seria a de extrair as influências destes factores de modo a tornar possível a identificação de variações associadas a fenómenos de profundidade. Para o efeito, esta análise poderá enquadrar-se no domínio das abordagens de análise multivariada (Draper e Smith, 1981; Reis, 1997) à semelhança do efectuado por Viveiros (2003) para o estudo do comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub>. No caso presente a série temporal obtida (apenas 4 meses) não é significativa do ponto de vista estatístico para a aplicação da metodologia indicada, deste modo, optou-se por se efectuar uma interpretação preliminar das variações observadas com base em relações simples e directas entre os parâmetros.

Quando se projecta a variação temporal da concentração de radão e o fluxo de CO<sub>2</sub> no solo (Fig. 4.3) observa-se que ambos variam do mesmo modo. Uma vez que para este local já foram estudadas as influências das variações atmosféricas sobre o fluxo de CO<sub>2</sub> (Viveiros, 2003), a análise que se segue tem em linha de conta, em primeiro lugar, os factores meteorológicos que parecem exercer uma maior influência neste local, nomeadamente, a pressão barométrica, a pluviosidade e a humidade no solo.

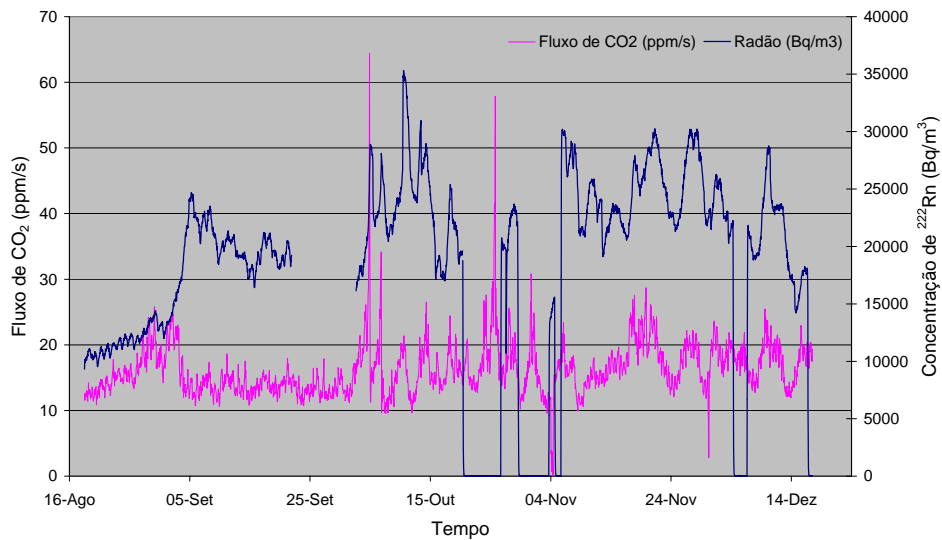


Figura 4.3 – Relação entre a variação temporal da concentração de <sup>222</sup>Rn e o fluxo de CO<sub>2</sub> no solo.

No que concerne à relação existente entre a variação temporal da concentração de radão no solo e a pressão barométrica, através da análise da figura 4.4 é possível verificar que de um modo geral estas variáveis têm comportamentos

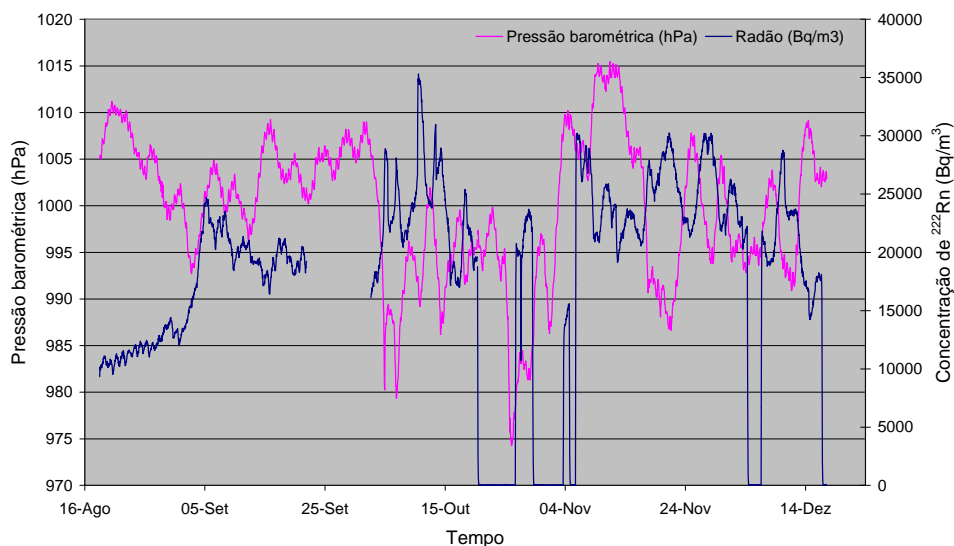


Figura 4.4 - Relação entre a variação temporal da concentração de <sup>222</sup>Rn no solo e a pressão barométrica.

inversos. Existem, no entanto, dois períodos em que tal não se verifica, o primeiro do dia 3 a 5 de Setembro e o segundo de 26 a 27 de Outubro.

No que diz respeito à pluviosidade e à humidade no solo, uma vez que estas duas variáveis estão ligadas entre si (Fig. 4.5), a discussão dos resultados obtidos em relação à variação temporal da concentração de radão no solo é feita simultaneamente.

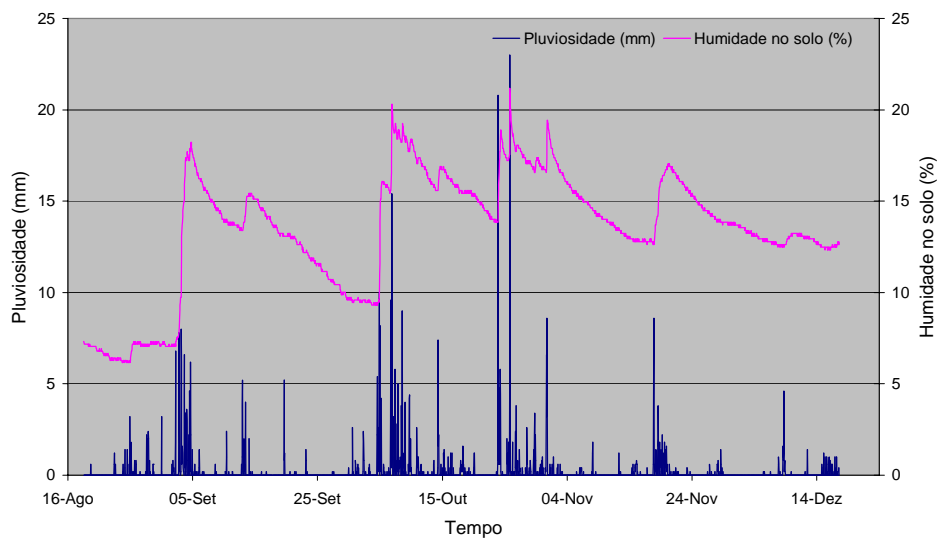


Figura 4.5 - Relação entre a variação temporal da pluviosidade e da humidade no solo.

O que se verifica de um modo geral, quer em relação à pluviosidade (Fig. 4.6) quer à humidade no solo (Fig. 4.7), é que sempre que se regista um incremento destes factores este é acompanhado por um incremento dos valores de concentração de radão.

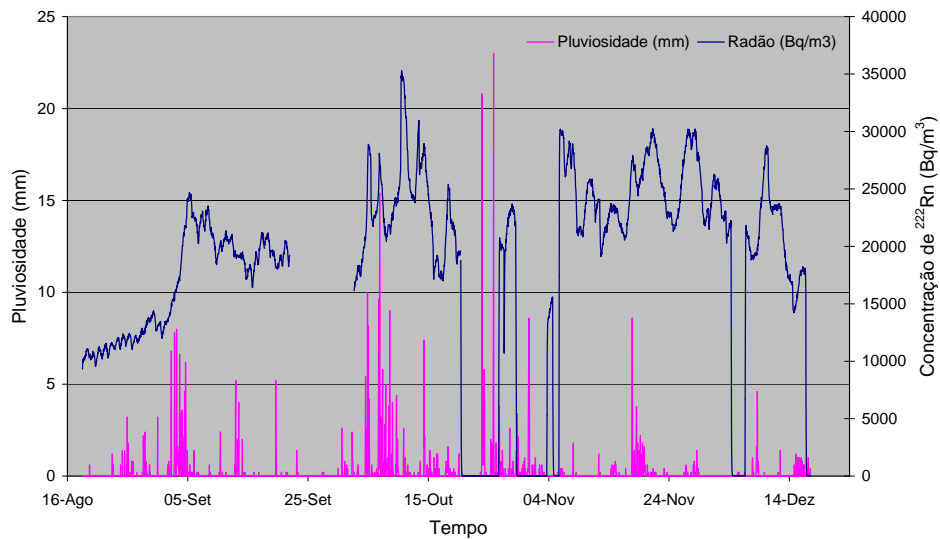


Figura 4.6 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e a pluviosidade.

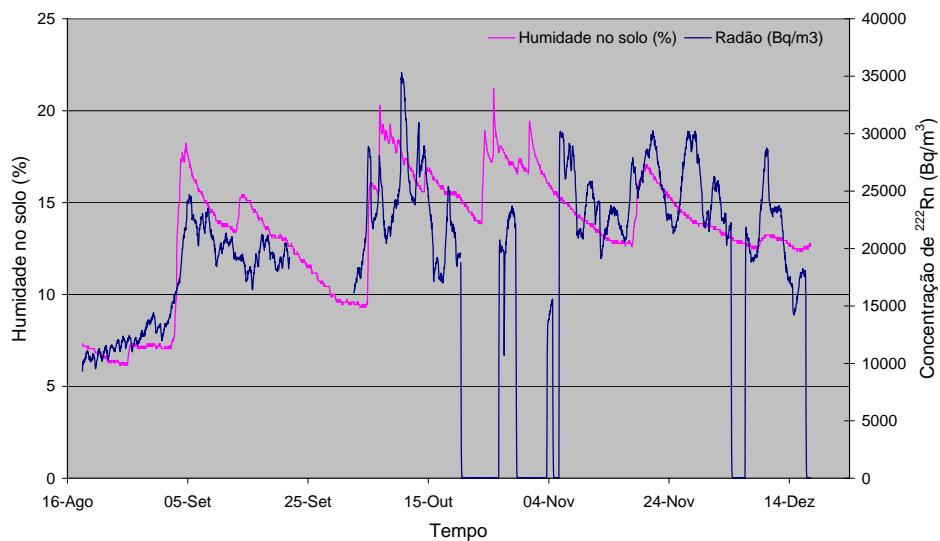


Figura 4.7 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e a humidade no solo.

No que diz respeito a factores como a velocidade do vento (Fig. 4.8) e a humidade relativa do ar (Fig. 4.9) não parece existir nenhuma relação entre a variação temporal destes factores e a variação temporal da concentração de radão no solo.

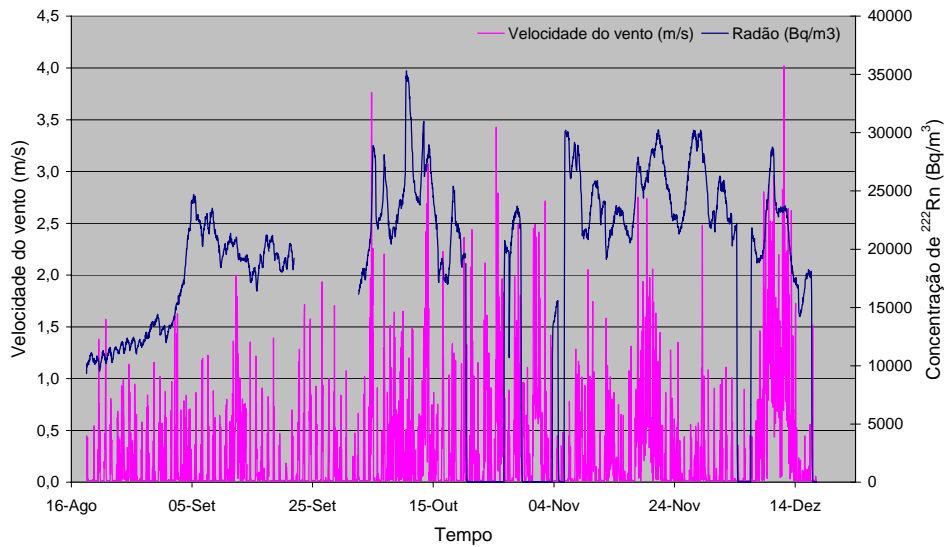


Figura 4.8 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e a velocidade do vento.

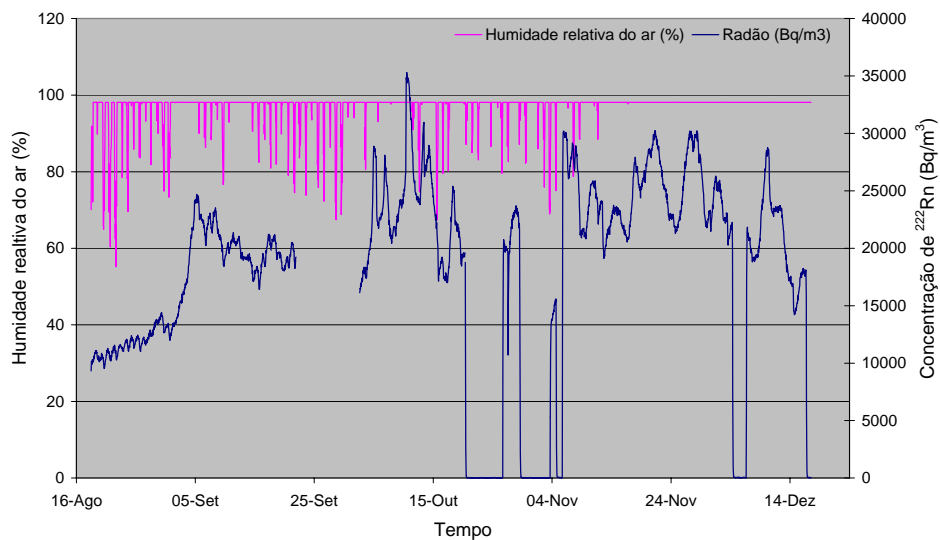


Figura 4.9 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e a umidade relativa do ar.

No que se refere à temperatura do solo (Fig. 4.10) e do ar (Fig. 4.11) não parece existir nenhuma relação entre a variação temporal destes factores e a variação temporal da concentração de radão no solo. No entanto, de um modo geral, quer a temperatura do ar quer a do solo apresentam um ligeiro decréscimo ao longo do

período deste ensaio, pelo contrário a tendência geral em relação à concentração de radão no solo é de um ligeiro incremento.

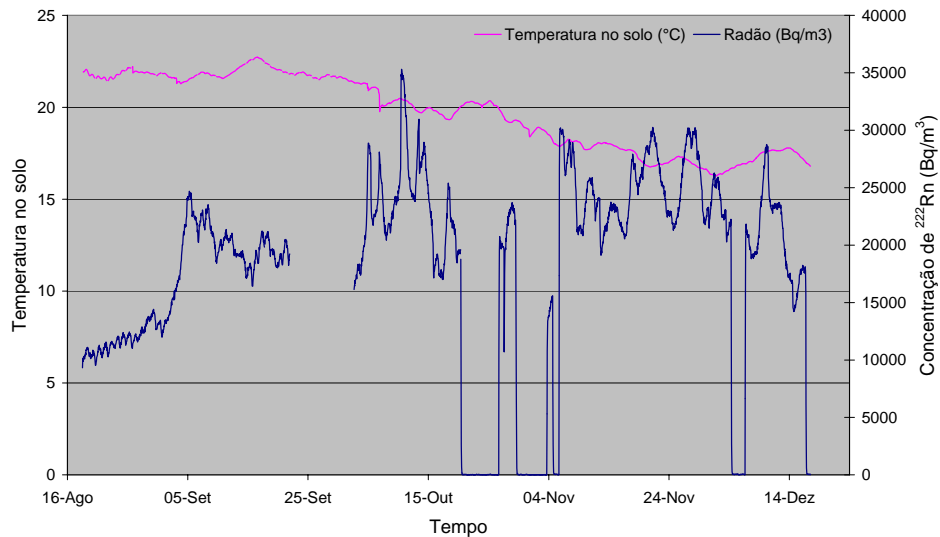


Figura 4.10 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e a temperatura do solo.

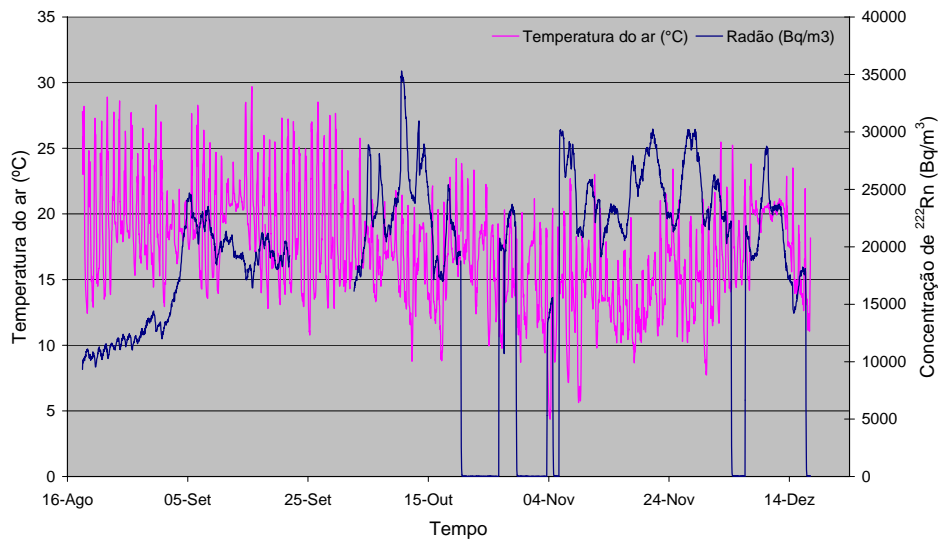


Figura 4.11 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e a temperatura do ar.

Da análise aqui realizada sobressai, por um lado, o facto da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e do fluxo de  $\text{CO}_2$  parecerem aparentar um comportamento similar, por outro, a

concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo parece ser influenciada pelos mesmos factores meteorológicos que exercem maior influência no fluxo de  $\text{CO}_2$ . É o caso da pressão barométrica, da pluviosidade e da humidade no solo.

No caso da pressão barométrica, esta parece influenciar inversamente a concentração de radão no solo, enquanto, que a relação da concentração deste gás com a pluviosidade e a humidade no solo evidencia uma relação directa.

Da análise conjunta destes factores verifica-se que a influência exercida sobre a concentração de radão no solo pela pressão barométrica é por vezes suplantada pela influência provocada pelo incremento da pluviosidade e da humidade no solo. O incremento da pluviosidade impede a passagem de gases através da superfície do solo, uma vez que todos os espaços livres estão ocupados por água o que conduz à impermeabilização do solo. Essa situação pode levar à dissolução de radão nessa água e/ou à sua retenção em zonas mais profundas do solo. Como o ponto de amostragem está colocado a 80 cm de profundidade o radão aí retido é aspirado para o detector conduzindo a um incremento da sua concentração.

Salienta-se, no entanto, a necessidade de aquisição de um conjunto mais numeroso de dados com vista à confirmação das relações estabelecidas no presente trabalho. Finalmente verifica-se que os vários valores iguais ou muito próximos de zero não são relacionáveis com qualquer variável meteorológica o que aponta para que os mesmos sejam resultantes de problemas de ordem técnica relacionados com o funcionamento do detector.

## 5. SAÚDE PÚBLICA

### 5.1. Nota Prévia

O facto do radão ser um gás faz com que facilmente possa ser introduzido no organismo humano através da sua inalação durante a respiração ou através da ingestão de água, onde está dissolvido. Sendo um gás radioactivo, as partículas  $\alpha$  por si libertadas ou pelos produtos do seu decaimento podem representar um sério perigo para a saúde pública, provocando doenças como o cancro do pulmão (Hasbrouck, 1983).

Ao ar livre o radão não representa uma ameaça em termos de saúde pública uma vez que a sua dispersão no ar atmosférico impede que a sua concentração atinja valores prejudiciais (Jones, 1999). Este gás torna-se perigoso em ambientes fechados quando as pessoas são expostas a elevadas concentrações por períodos de tempo prolongados.

No interior de habitações a concentração de radão pode atingir valores que ultrapassam em muito o oficialmente estabelecido, representando nestas situações uma séria ameaça para a saúde humana. Nestes ambientes as fontes de radão podem ser: o solo sobre o qual a construção foi edificada, os materiais de construção da própria casa e a água proveniente quer de abastecimento público quer de poços (Hasbrouck, 1983).

Neste capítulo pretende-se fazer uma abordagem ao perigo que o radão representa em termos de saúde pública na freguesia das Furnas. Para o efeito realizou-se a monitorização da concentração de radão no interior de uma habitação, no sentido de analisar as variações encontradas e compreender de que modo este gás é introduzido nestes espaços fechados. Por último apresentam-se algumas medidas de mitigação do risco.

## 5.2. Radão e Saúde

As implicações do radão em termos de saúde pública resultam do facto deste gás ser radioactivo. Assim, através da inalação o radão é introduzido no organismo podendo decair originando novos produtos radioactivos, sólidos, cujo decaimento sucessivo se processará no seu interior (Hasbrouck, 1983).

Considera-se que 30 % dos produtos de decaimento do radão adiram às vias respiratórias e aos pulmões. Da radiação que é emitida por estes produtos ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ) as partículas  $\alpha$  são as que representam maior perigo uma vez que são as maiores e as que apresentam maior energia podendo penetrar nos tecidos danificando as células situadas perto das superfícies das vias respiratórias (Hasbrouck, 1983). As partículas  $\alpha$  podem penetrar nos tecidos epiteliais do pulmão, provocando danos e mutações nas suas células conduzindo ao desenvolvimento de cancro no pulmão (Boice e Lubin, 1997).

Ao nível molecular, as partículas  $\alpha$  provocam alterações pela transferência de electrões. No caso da molécula afectada ser de DNA então todo o funcionamento da célula pode ser alterado, transmitindo-se a novas células pela sua reprodução (Hasbrouck, 1983).

Diversos estudos corroboram o facto de que a exposição a concentrações elevadas de radão aumenta o risco de aquisição de cancro no pulmão (Lubin *et al.*,

2004; Laurier *et al.*, 2004; Wichmann *et al.*, 2005). Na realidade esta é considerada a segunda causa de cancro de pulmão a nível mundial (Yarar *et al.*, 2005) e a principal responsável por esta doença em não fumadores. A longo prazo, os fumadores expostos a elevadas concentrações de radão têm cerca de 10 a 20 vezes maior risco de contraírem cancro do pulmão (Williams-Jones e Reymer, 2000). Este gás corresponde ao risco geológico que provoca maior número de mortes, ultrapassando mesmo o número de mortes devido a sismos (Birchall e Marsh, 2005).

Os primeiros estudos que evidenciaram uma forte relação entre a exposição a elevadas concentrações de radão e o cancro do pulmão foram realizados em mineiros que durante muitos anos trabalharam em minas de urânio (Schröder *et al.*, 2002). A crescente preocupação com a exposição a este gás e a sua relação com o cancro de pulmão conduziu à realização de diversos estudos com o objectivo de se conhecer a implicação da exposição a este gás no interior de habitações (*e.g.*: Lubin *et al.*, 2004).

No que diz respeito ao radão que é ingerido na água, o problema reside na sua transferência, através das paredes do intestino, por difusão. A exposição à radiação dos órgãos do aparelho digestivo é limitada uma vez que, comparativamente, a quantidade de água ingerida é muito inferior à quantidade de ar que é inalada (Hasbrouck, 1983). Algumas células da parede do estômago podem ser afectadas, mas a maior parte da radiação é absorvida pela presença de alimentos. Apesar desta atenuação o radão é também considerado um dos responsáveis pelo cancro do estômago, cólon e de outros órgãos (Voronov, 2004). O radão é ainda suspeito de provocar leucemia (Voronov, 2004; Jones, 1999).

Mas nem sempre a exposição humana à radiação pode ser prejudicial, dependendo da reação de cada organismo, da sua genética e de factores ambientais. Algumas das consequências da exposição à radiação só surgem passados muitos anos ou passadas algumas gerações. Assim sendo, alguns autores (Voronov, 2004; Falkenbach *et al.* 2005) defendem que o radão pode apresentar também alguns benefícios em termos de saúde, como sejam, a sua utilização em balneários de águas ricas em radão para efeitos terapêuticos e a exposição a radiação natural para estimular o sistema imunitário.

Em estâncias de águas minerais na Rússia, Alemanha, Áustria e República Checa, a água rica em radão tem diversas aplicações terapêuticas sendo utilizada em banhos, na ingestão e inalação e também no tratamento dos sistemas nervoso, cardiovascular e pulmonar e em doenças reumáticas (Voronov, 2004). De acordo com Falkenbach *et al.*, (2005), a aplicação de tratamentos com recurso ao radão em doentes reumáticos conduziram ao alívio das dores e a melhorias na movimentação.

No entanto, alguns aspectos relacionados com a utilização terapêutica destas águas requerem um estudo mais aprofundado, nomeadamente no que diz respeito às doses necessárias, a influências várias quer ao nível de saúde, quer de outros elementos existentes nestas águas, à preservação da sua composição química e à acumulação de níveis elevados de radão no ar (Voronov, 2004). A realidade é que nenhuma das organizações internacionais de saúde reconhece no radão benefícios para a saúde. Antes pelo contrário, algumas delas, como por exemplo a Organização

Mundial de Saúde, consideram o radão como um agente cancerígeno (ECA,1995; Kozłowska *et al.*, 1999).

### 5.3. Radão no Interior de Habitações

Como referido, a concentração de radão no interior de habitações depende essencialmente de factores como as características do solo, do material de construção e da concentração de radão presente na água que abastece a habitação (Hasbrouck, 1983; Singh *et al.*, 2005b). De acordo com Kitto (2005), os aspectos geológicos (estado de fracturação das rocha e a presença de falhas) e as condições atmosféricas (velocidade do vento, pressão barométrica e precipitação) também influenciam a concentração deste gás em espaços fechados. Para além dos factores mencionados a concentração deste gás no interior da habitação depende ainda dos hábitos dos seus ocupantes, do arejamento a que a habitação está sujeita e da quantidade de aerossóis presente no ar (Sahota *et al.*, 2005).

O radão presente no solo pode ser introduzido no interior de habitações por difusão através de fendas e fissuras nas fundações, no chão ou nas paredes (Hasbrouck, 1983; Wysocka *et al.*, 2005). Por outro lado, também as diferenças de pressão entre o interior e o exterior podem forçar o geogás a entrar no interior da habitação, desta vez, por advecção (Oliver e Khayrat, 2001). Estes factores, associados ao facto deste gás ser aproximadamente 7,6 vezes mais pesado do que o ar atmosférico, contribuem para que a concentração de radão no interior de habitações seja superior nos pisos inferiores, como sejam, a cave e o rés-do-chão (Voronov, 2004).

O tipo de material de construção pode também ser outra fonte de radão no interior da habitação. As rochas magmáticas ácidas tais como traquitos e granitos apresentam uma maior quantidade de  $^{238}\text{U}$  produzindo, conseqüentemente, uma maior concentração de radão resultante do seu decaimento (Hasbrouck, 1983; Wiegand, 2001).

A introdução do radão pela água em espaços fechados é resultado da sua grande solubilidade. Assim nas actividades domésticas diárias o radão dissolvido pode libertar-se, aumentando a sua concentração no ar atmosférico (Hasbrouck, 1983). Cerca de 90 % da concentração de radão existente na água pode ser transferida para o ar sendo este processo mais rápido se a água for aquecida (Noronov, 2004). A maioria da água de abastecimento público apresenta uma concentração de radão baixa, uma vez que permanece nos reservatórios durante algum período de tempo, o que possibilita o decaimento de uma parte significativa do radão inicial (Hasbrouck, 1983). O limite recomendado pela Agência para a Protecção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (1999) para a água de consumo é de  $148000 \text{ Bq/m}^3$  ( $4000 \text{ pCi/L}$ ). No entanto, em vários países europeus (e.g. Suécia, Finlândia e Grã-Bretanha) o limite recomendado é de  $100000 \text{ Bq/m}^3$  ( $100 \text{ Bq/L}$ ) para as águas municipais (Horváth *et al.*, 2000). A média mundial de radão na água é de  $10000 \text{ Bq/m}^3$  (UNSCEAR, 1993).

A concentração média mundial de radão no interior de habitações é  $40 \text{ Bq/m}^3$  (Tóth *et al.*, 1997). Contudo, diversas organizações internacionais recomendam como limite a partir do qual se deve intervir numa habitação os  $200 \text{ Bq/m}^3$  (tabela 5.1). Em Portugal a legislação existente restringe-se a edifícios construídos em zonas graníticas

e fixa os 400 Bq/m<sup>3</sup> como limite para a concentração de radão no interior das habitações nestas regiões (D.L. nº79/2006 Artº. 29).

Tabela 5.1- Limites recomendados para a concentração de <sup>222</sup>Rn no interior de habitações (Bq/m<sup>3</sup>).

<b>Organização</b>	<b>Habitações Existentes</b>	<b>Habitações Futuras</b>
CEC - Comissão da Comunidade Europeia (1990)	400	200
EPA - Agência para a Protecção Ambiental dos Estados Unidos (2002)	148	148
ICRP* - Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação (1984)	400	200
ICRP* - Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação (1993)	200 a 600	**
WHO* - Organização Mundial de Saúde (1987)	200	200
Legislação Portuguesa (2006)	400	400

\* *In* ECA, 1995.

\*\* Em 1993 a ICRP considerou mais vantajoso substituir a definição de um limite de intervenção por um conjunto de recomendações de boas práticas para a construção de novas habitações.

## 5.4. Monitorização Contínua de Radão no Interior de uma Habitação na Freguesia das Furnas

### 5.4.1. Metodologia

#### 5.4.1.1. Equipamento

Na amostragem contínua da concentração de radão no interior da habitação foi utilizado o mesmo equipamento descrito nas aplicações anteriores. O modo de funcionamento utilizado nesta amostragem foi o modo *Auto*, descrito no ponto 4.2.1, dedicado à monitorização contínua de radão no solo.

Complementarmente efectuou-se a amostragem contínua de CO<sub>2</sub> tendo-se utilizado para o efeito um detector *Anagas<sup>TM</sup>* CD 95 da *Environmental Instruments*. Este detector corresponde a um espectrómetro de infravermelhos que permite medir a concentração de CO<sub>2</sub> (%vol.) com uma resolução de 0,1 % e uma precisão de 2 % (Geotechnical Instruments, 1996).

Para a amostragem da concentração de <sup>222</sup>Rn e de CO<sub>2</sub> no interior da habitação, para além do material de apoio descrito no ponto 4.2.1, foi ainda utilizada uma caixa de protecção, onde foram colocados os equipamentos utilizados (Foto 5.1).



Fotografia 5.1 – Instalação dos detectores de  $^{222}\text{Rn}$  e de  $\text{CO}_2$  na habitação.

#### 5.4.1.2. Amostragem

O período de amostragem decorreu entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005. A habitação seleccionada para a instalação da estação de radão e do detector de  $\text{CO}_2$  fica localizada perto da ribeira dos Tambores, nas proximidades da zona onde foi detectada a concentração de radão no solo mais elevada. Esta habitação foi construída em 1996, tendo como principais materiais empregues blocos e cimento e apresenta três pisos: cave, rés-do-chão e primeiro andar. O contacto com o solo é feito através da cave, sob a qual se encontra uma caixa-de-ar. A ventilação da cave é efectuada por 6 janelas (Foto 5.2) e 1 porta. Neste local a água utilizada destina-se unicamente ao funcionamento de uma máquina de lavar roupa.



Fotografia 5.2 – Cave da habitação. Quatro das janelas que facilitam a ventilação deste espaço.

Os detectores de  $\text{CO}_2$  e de  $^{222}\text{Rn}$  foram instalados na cave cujo piso se encontra cimentado. O ponto de amostragem situou-se a cerca de 22 cm acima do chão. As amostragens foram realizadas em intervalos de 59 minutos, por motivos que se prendem com a sincronização dos dois equipamentos. No caso da amostragem de  $\text{CO}_2$ , a bomba do detector aspira o ar ambiente durante cerca de 30 segundos no final de cada ciclo. Foram, também, adicionados filtros de retenção de poeiras e de humidade aos circuitos de entrada do ar para estes detectores.

Durante este período de amostragem foi possível observar que ocasionalmente ocorriam incrementos dos valores de  $\text{CO}_2$  e de  $^{222}\text{Rn}$ . Estas variações pareciam associadas aos dias em que os residentes tinham reduzido a ventilação na cave. A suspeição de que tais valores poderiam estar associados com a redução do

arejamento neste espaço fez com que se efectuasse um teste para confirmar esta possível relação. A experiência decorreu entre as 19:15 do dia 7 e as 22:00 do dia 9 de Dezembro, abrangendo um período de aproximadamente 51 horas durante o qual a cave foi mantida completamente fechada (porta e janelas).

#### **5.4.1.3. Parâmetros Meteorológicos**

A aquisição de dados de monitorização de  $^{222}\text{Rn}$  e de  $\text{CO}_2$  foi acompanhada da aquisição, em simultâneo, de dados de pressão atmosférica no interior da habitação através do sensor integrado no equipamento de  $\text{CO}_2$ . A este conjunto de informação foi adicionada toda a informação ambiental fornecida pela estação GFUR1.

#### **5.4.1.4. Recolha e Tratamento de Dados**

De acordo com a capacidade de armazenamento dos equipamentos, os dados foram recolhidos uma vez por mês, no caso do  $^{222}\text{Rn}$ , e duas vezes por mês, no caso do  $\text{CO}_2$ . A qualidade/validade dos dados de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  obtidos foi analisada em função da percentagem de humidade no detector, à semelhança do que foi efectuado nos estudos apresentados anteriormente. A este conjunto de informação foi adicionada a fornecida pela estação GFUR1. Todos os dados, incluindo a informação ambiental e de fluxo de  $\text{CO}_2$ , foram convertidos em ficheiros *Excel*.

### 5.4.2. Apresentação dos Resultados

Os valores obtidos podem ser consultados em formato digital no anexo III e abrangem uma gama de valores que oscila entre os 0 e os 13272,91 Bq/m<sup>3</sup> para a concentração de <sup>222</sup>Rn e entre os 0 e os 6 %vol. para a concentração de CO<sub>2</sub> (tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Valores máximo, mínimo e médio da concentração de <sup>222</sup>Rn e de CO<sub>2</sub> com base na totalidade dos dados monitorizados (1) e excluindo os dados relativos ao teste efectuado (2).

(1)	Concentração de <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Concentração de CO <sub>2</sub> (%vol.)
Valor Máximo	13272,91	6,0
Valor Mínimo	0,00	0,0
Valor Médio	599,85	0,2
(2)	Concentração de <sup>222</sup> Rn excluindo o teste de 7 a 9 de Dezembro (Bq/m <sup>3</sup> )	Concentração de CO <sub>2</sub> excluindo o teste de 7 a 9 de Dezembro (%vol.)
Valor Máximo	1085,46	0,2
Valor Mínimo	0,00	0,0
Valor Médio	212,82	0,0

A distribuição temporal da concentração de radão na habitação no período amostrado pode ser observada nas figuras 5.1 e 5.2, enquanto que a representação da distribuição temporal da concentração de CO<sub>2</sub> pode ser observada nas figuras 5.3 e 5.4.

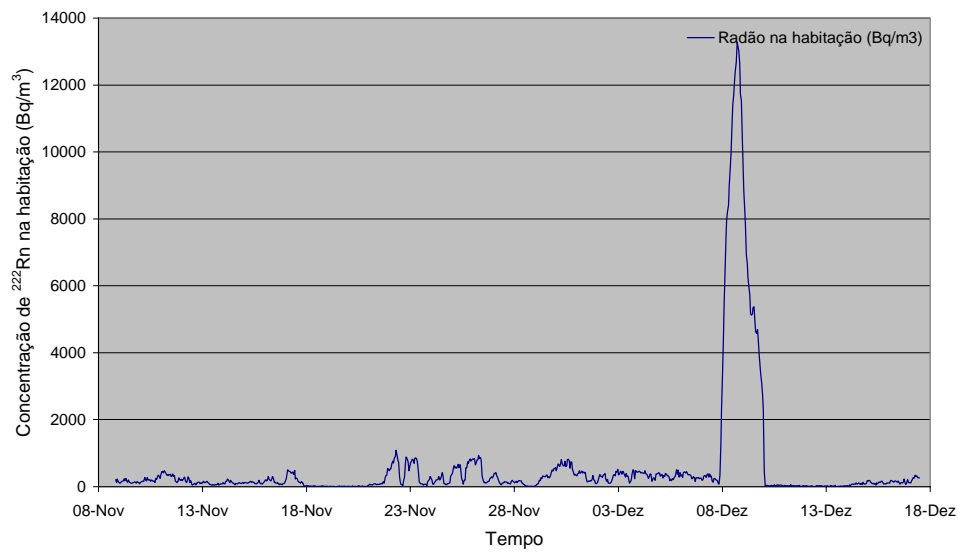


Figura 5.1 – Variação temporal dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.

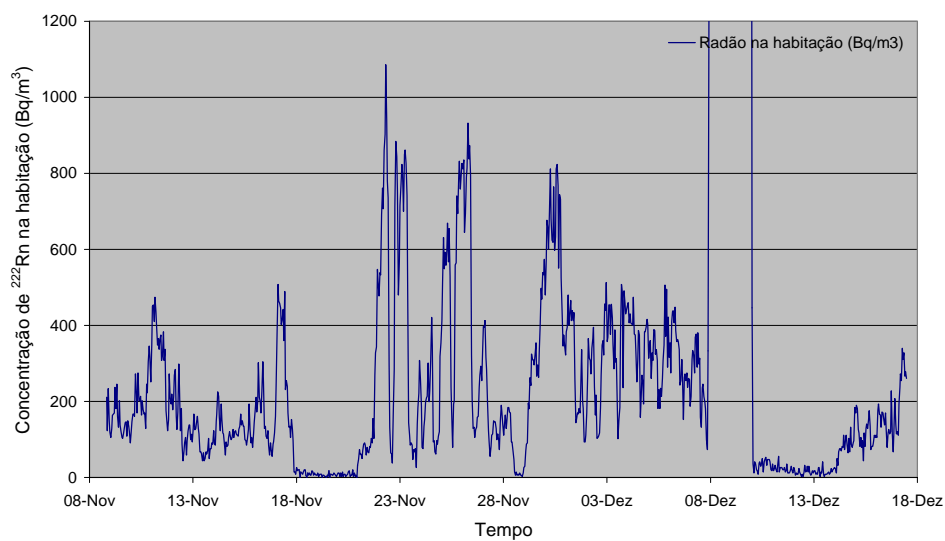


Figura 5.2 - Variação temporal dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação da escala. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.

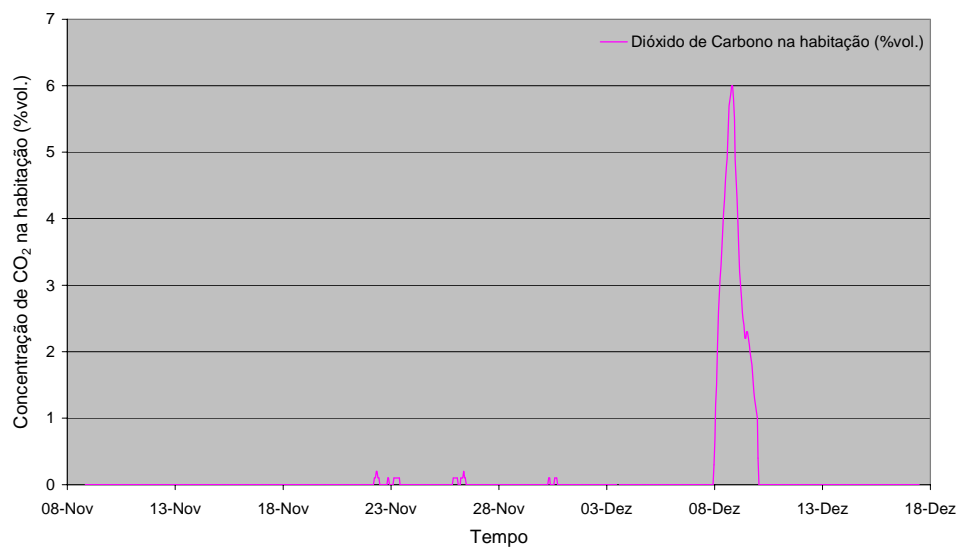


Figura 5.3 – Variação temporal dos valores de concentração de CO<sub>2</sub> na habitação. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.

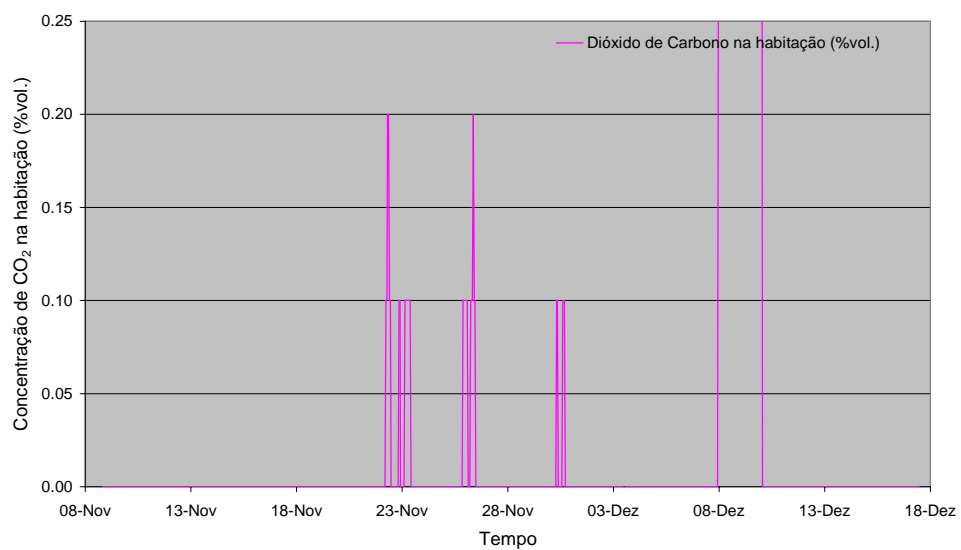


Figura 5.4 - Variação temporal dos valores de concentração de CO<sub>2</sub> na habitação, com ampliação da escala. A zona a sombreado corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.

Durante o período de amostragem, os valores de humidade no interior do detector foram inferiores a 10 % (Fig. 5.5) assim, todos os valores de concentração de radão obtidos são considerados válidos.

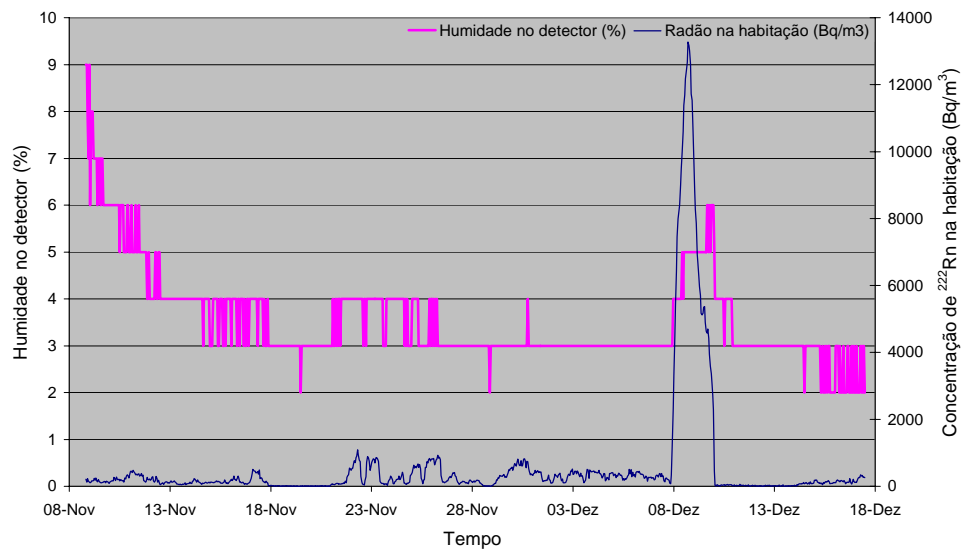


Figura 5.5 – Relação entre a variação temporal da humidade no interior do detector e a concentração de <sup>222</sup>Rn na habitação.

### 5.4.3. Discussão dos Resultados

A análise dos resultados obtidos é efectuada tendo em atenção a sua possível relação com diversas variáveis como: (1) presença ou ausência de ventilação na cave, (2) variações do fluxo de CO<sub>2</sub> no solo, (3) variações da concentração de <sup>222</sup>Rn no solo e (4) factores meteorológicos.

Durante o período de amostragem em análise é possível constatar que ocorreram períodos de grandes incrementos simultâneos das concentrações de <sup>222</sup>Rn e de CO<sub>2</sub> (Fig. 5.6). Os valores máximos registados foram adquiridos durante o intervalo de tempo em que decorreu o teste dos dias 7 a 9 de Dezembro. Durante este período os valores da concentração de <sup>222</sup>Rn atingiram os 13272,91 Bq/m<sup>2</sup> e a concentração de CO<sub>2</sub> atingiu os 6 %vol.

Para além deste período, em três outras ocasiões os valores de <sup>222</sup>Rn atingiram valores superiores a 800 Bq/m<sup>3</sup> (Fig. 5.7). Estes incrementos de <sup>222</sup>Rn foram acompanhados por um aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no ar que não ultrapassou os 0,2 %vol. Estas ocorrências verificaram-se entre os dias 22 e 26 do mês de Novembro e no dia 30 do mesmo mês e correspondem a períodos em que a ventilação da cave foi reduzida. Assim, a redução ou ausência de ventilação na cave contribui de um modo significativo para o incremento da concentração dos gases em análise neste espaço.

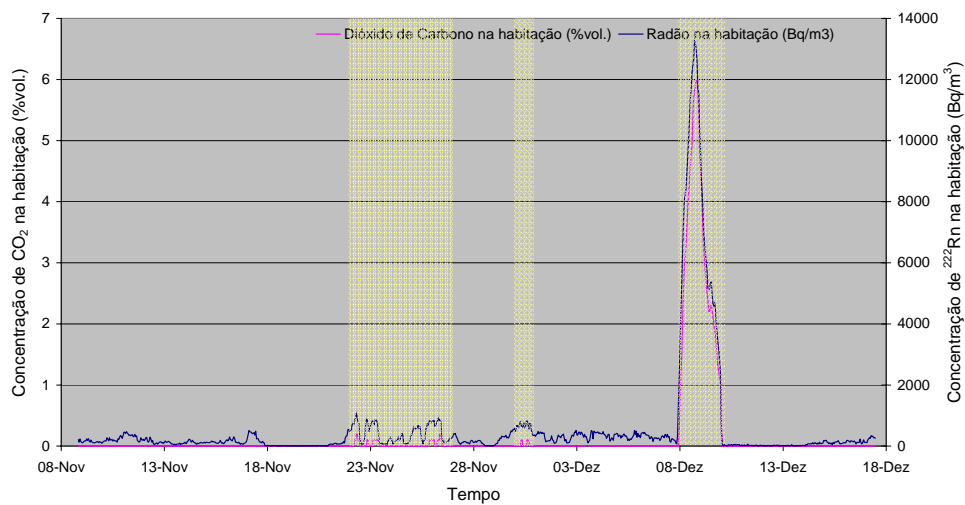


Figura 5.6 - Relação entre a variação temporal da concentração de CO<sub>2</sub> e de <sup>222</sup>Rn na habitação. As zonas a sombreado correspondem a períodos onde a ventilação foi reduzida ou mesmo nula.

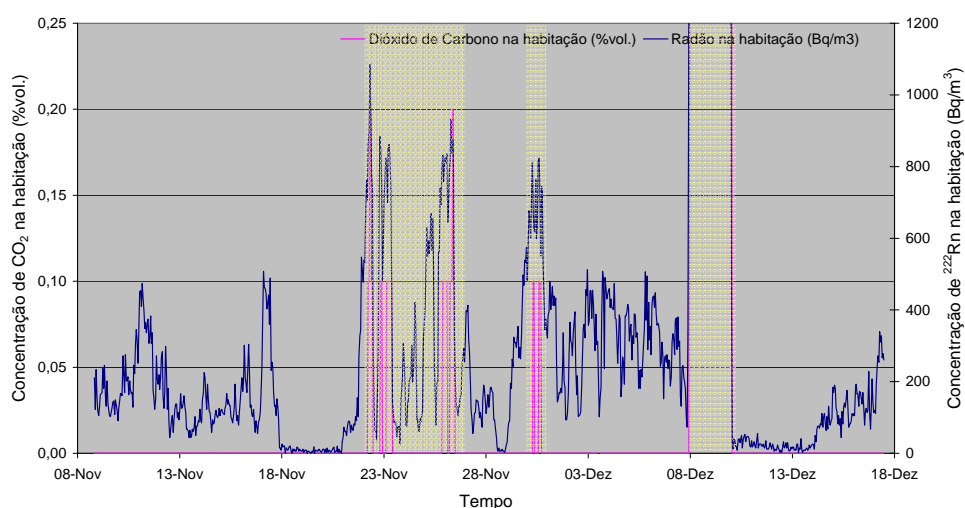


Figura 5.7 - Relação entre a variação temporal da concentração de CO<sub>2</sub> e de <sup>222</sup>Rn na habitação, com ampliação das escalas. As zonas a sombreado correspondem a períodos onde a ventilação foi reduzida ou mesmo nula.

A comparação da variação da concentração de dióxido de carbono com a variação do fluxo deste gás no solo obtido pela estação GFUR1 (Fig. 5.8) não revela nenhuma relação entre estas variáveis.

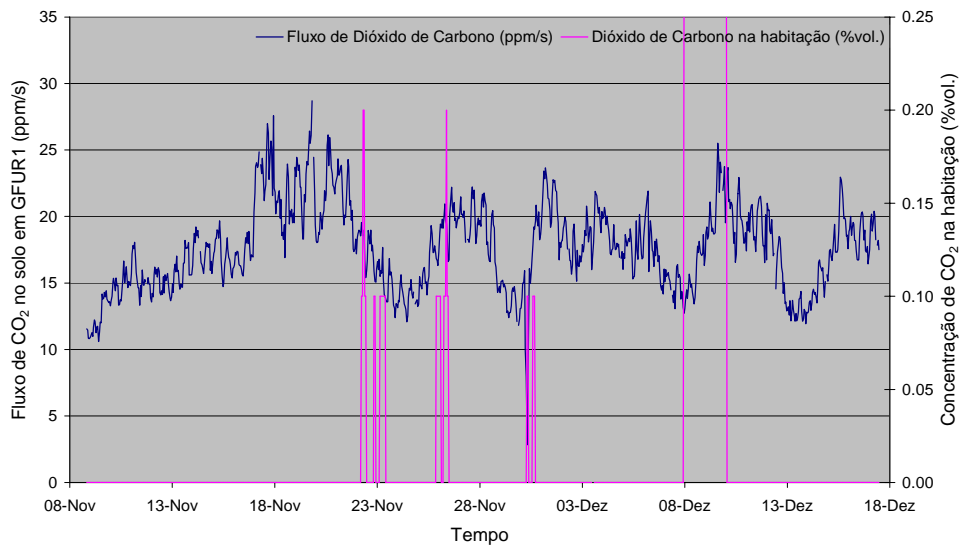


Figura 5.8 - Relação entre a variação temporal do fluxo de CO<sub>2</sub> no solo na estação GFUR1 e a concentração deste gás no interior da habitação, com ampliação da escala.

A representação gráfica da relação temporal existente entre a concentração de radão no interior da habitação e no solo em GFUR1 (Fig. 5.9) sugere que, apesar de no período inicial entre os dias 8 e 13 de Novembro a variação da concentração de radão na habitação parecer acompanhar a variação da concentração deste gás no solo, tal não se verifica ao longo do restante período de amostragem. Um exemplo deste facto corresponde ao período compreendido entre os dias 27 e 29 de Novembro em que os valores da concentração de radão no solo correspondem a valores elevados, próximos dos 30000 Bq/m<sup>3</sup>, e os valores de concentração de radão na habitação são inferiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>.

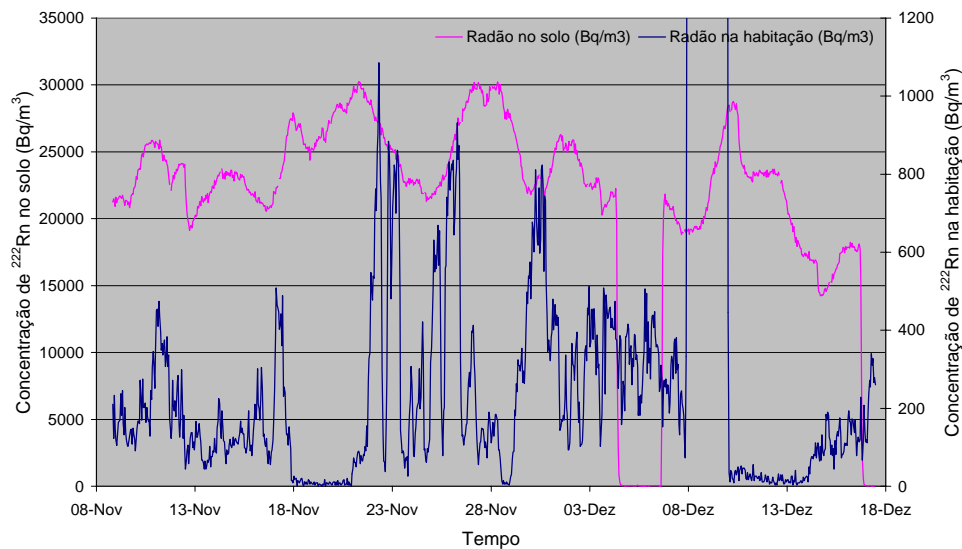


Figura 5.9 - Relação entre a variação temporal da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo na estação GFUR1 e no interior da habitação, com ampliação da escala.

Como já foi anteriormente referido os factores meteorológicos exercem influência na concentração de radão no solo. Assim, torna-se necessário compreender de que modo os factores meteorológicos influenciam ou não a concentração de radão na habitação.

Em relação à pressão barométrica, quando se projecta a sua variação temporal no interior e no exterior da habitação (Fig. 5.10) verifica-se, tal como seria de esperar, um comportamento semelhante. Através da análise da figura 5.11 verifica-se que sempre que um incremento da concentração de radão parece acompanhar um incremento da pressão, como é o caso do período compreendido entre os dias 22 e 26 de Novembro e o dia 30 de Novembro, esse incremento da concentração de radão é, na realidade, resultado da diminuição da eficiência de ventilação pelo que não parece

existir nenhuma relação entre a variação temporal da pressão barométrica e a variação temporal da concentração de radão na habitação.

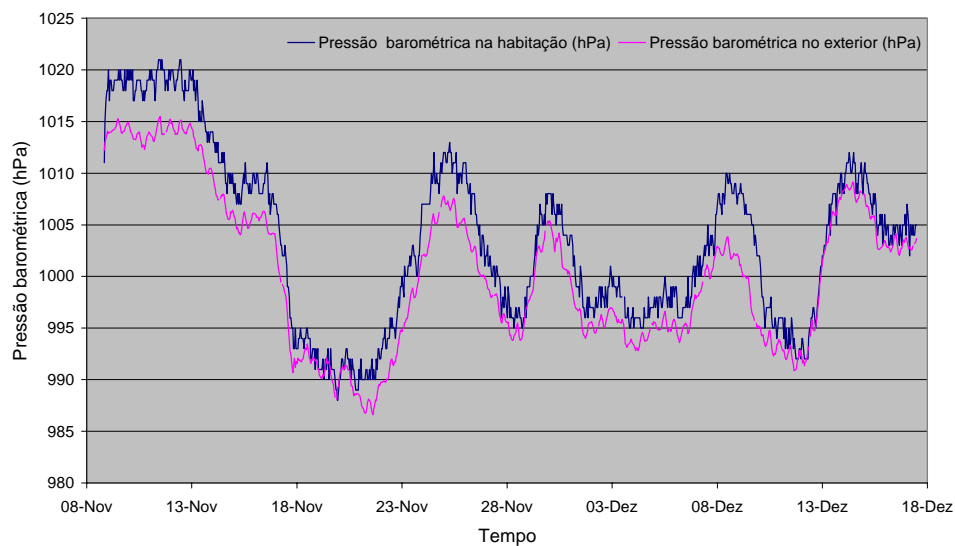


Figura 5.10 - Relação entre a variação temporal da pressão barométrica no interior e no exterior da habitação.

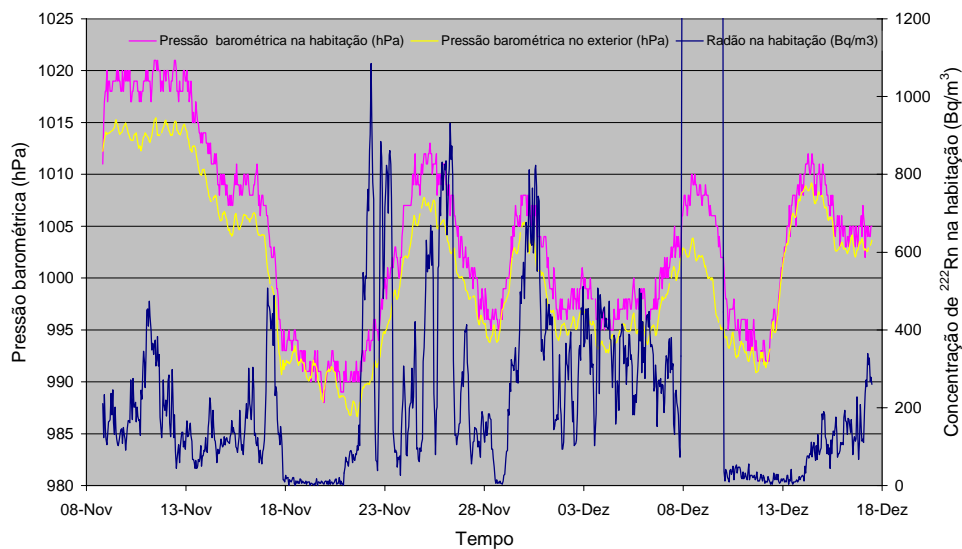


Figura 5.11 - Relação entre a variação temporal da pressão barométrica no interior e exterior da habitação e da concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , com ampliação da escala.

No que se refere à temperatura do ar no exterior da habitação (Fig. 5.12) e no solo (Fig. 5.13) não parece existir nenhuma relação entre a variação temporal destes factores e a variação temporal da concentração de radão na habitação.

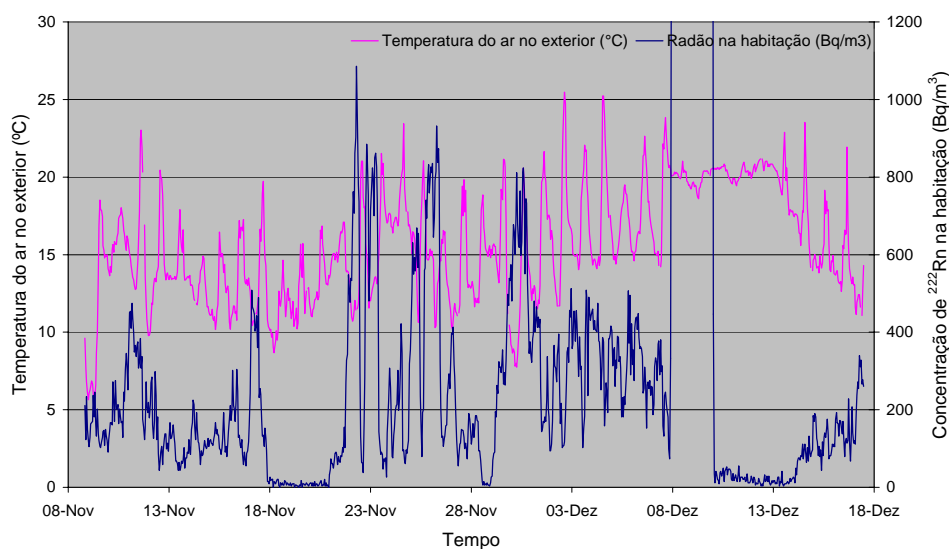


Figura 5.12 - Relação entre a variação temporal da temperatura no ar no exterior e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior da habitação, com ampliação da escala.

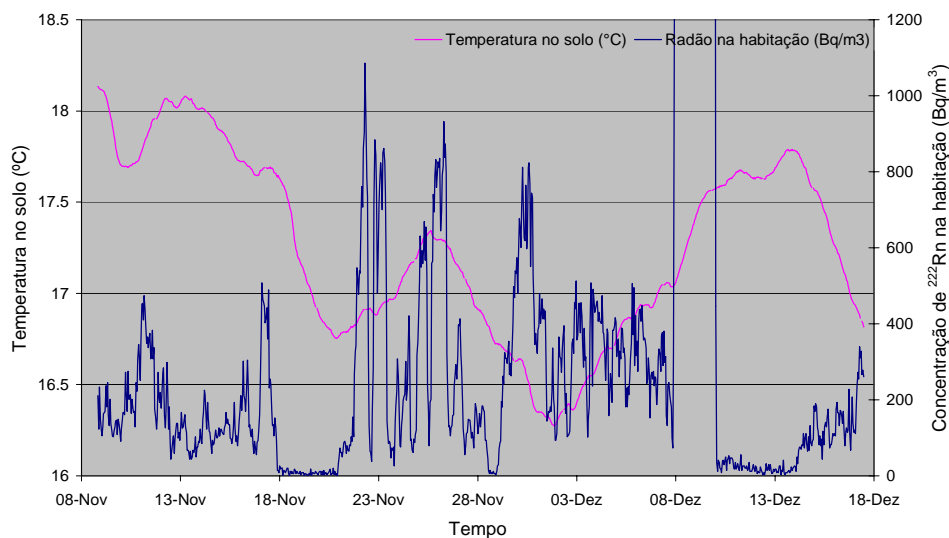


Figura 5.13 - Relação entre a variação temporal da temperatura no solo e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior da habitação, com ampliação da escala.

A projecção da variação temporal da humidade relativa do ar no exterior da habitação (Fig. 5.14) e a variação temporal da concentração de radão sugere a não existência de nenhuma relação entre estas variáveis.

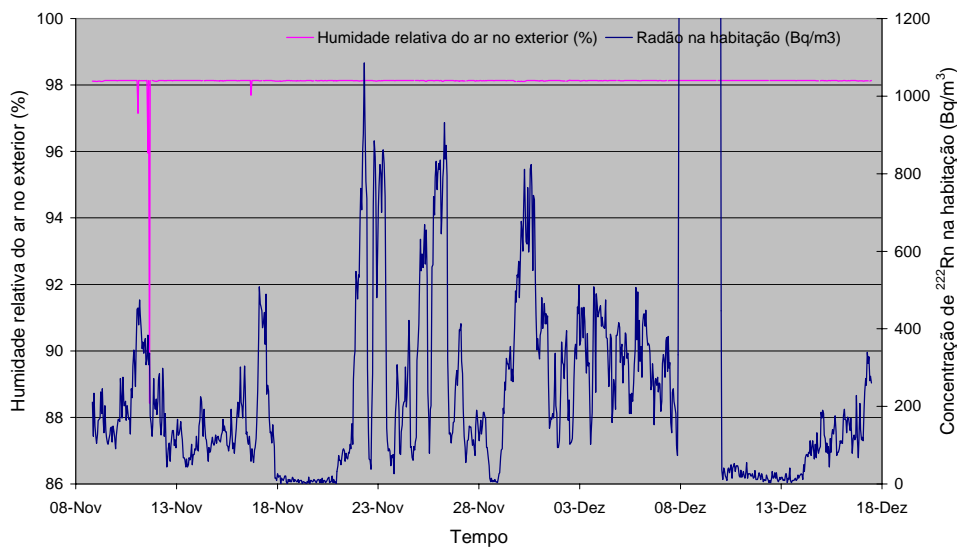


Figura 5.14 - Relação entre a variação temporal da humidade relativa do ar no exterior e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior da habitação, com ampliação da escala.

No que se refere à pluviosidade e à humidade no solo (Fig. 5.15), não é clara uma relação directa entre estas variáveis, não obstante, ocasionalmente se verificarem ligeiros incrementos na concentração de  $^{222}\text{Rn}$  durante períodos de maior precipitação, a duração desta monitorização não é suficiente para o estabelecimento de uma relação mais clara.

A projecção da velocidade do vento e a concentração de radão salienta o facto de que um aumento da velocidade do vento facilita o arejamento e diminui a concentração dos gases em análise no ar (Fig. 5.16). Nos períodos de maior velocidade do vento, entre os dias 18 e 21 de Novembro e os dias 10 e 14 de

Dezembro, verifica-se que os valores de concentração de radão se mantêm baixos. Mesmo no período compreendido entre os dias 22 e 26 de Dezembro, um incremento da velocidade do vento é suficiente para facilitar o arejamento, através da caixa-de-ar e da janela aberta, promovendo a diminuição da concentração de radão na cave.

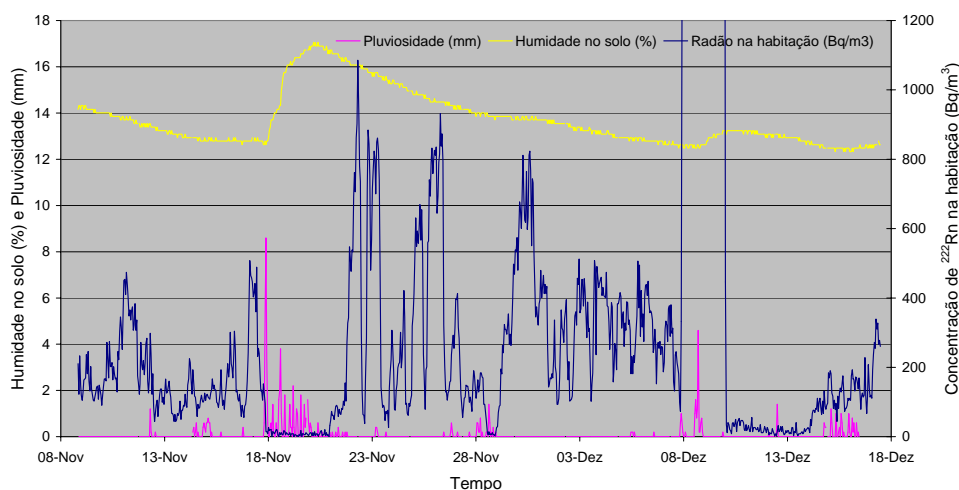


Figura 5.15 - Relação entre a variação temporal da pluviosidade e da humidade no solo com a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação da escala.

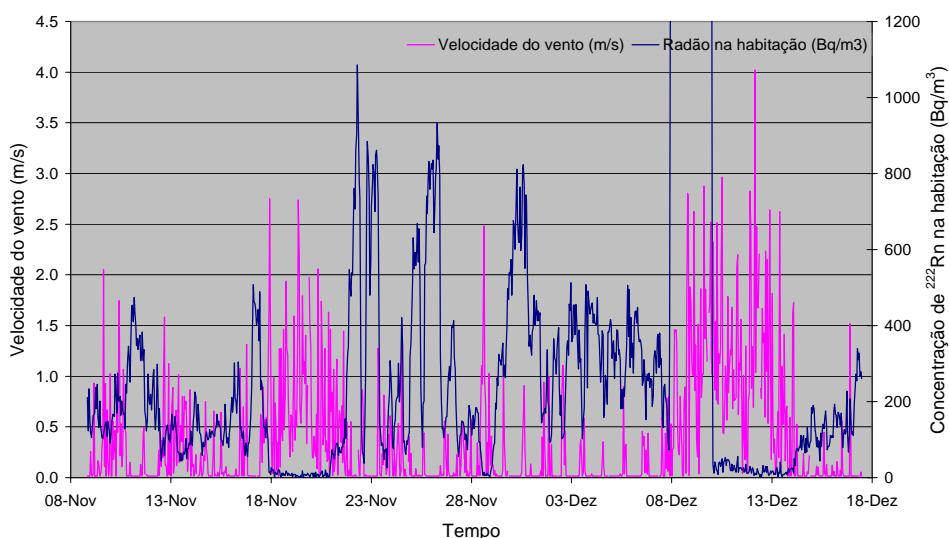


Figura 5.16 - Relação entre a variação temporal da velocidade do vento e a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  na habitação, com ampliação da escala.

Pelo exposto verifica-se que as variações de  $^{222}\text{Rn}$  e de  $\text{CO}_2$  são essencialmente devidas a variações na ventilação. Esta resulta quer dos hábitos dos residentes, quer da velocidade do vento. A diminuição da ventilação da cave conduz a um incremento de  $^{222}\text{Rn}$  e de  $\text{CO}_2$  neste espaço. Os hábitos dos próprios residentes também influenciam a concentração de radão. Ao encerrarem algumas das janelas sempre que ocorrem períodos de maior precipitação estão a contribuir para uma diminuição da eficácia da ventilação, pelo que, durante e/ou após estes períodos os valores de concentração de radão sofrem um incremento. Um aumento da velocidade do vento provoca a diminuição da concentração deste gás na cave da habitação uma vez que promove a ventilação deste espaço.

A principal fonte para a entrada de radão nesta habitação é o solo. A relação da concentração  $^{222}\text{Rn}$  com a concentração de  $\text{CO}_2$  leva a atribuir a origem do  $^{222}\text{Rn}$  ao solo, assim como a localização desta habitação próxima de uma zona anómala de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo. A utilização de água nesta cave, tal como referido anteriormente, restringe-se à utilização da máquina de lavar roupa o que excluiu a água como fonte provável e a contribuição do material de construção desta habitação não foi abordada neste estudo.

A análise das variações temporais da concentração de radão (Figs. 5.6 e 5.7) evidencia que este gás pode representar um problema em termos de saúde sempre que a ventilação é deficiente ou nula. No teste do dia 7 a 9 de Dezembro o valor da concentração deste gás atingiu os  $13272,91 \text{ Bq/m}^3$  tendo em consideração que a concentração de radão presente em minas varia entre os 2000 e os  $30000 \text{ Bq/m}^3$

(Bogen e Cullen, 2002) este é um valor que exige atenção. Por outro lado, o valor médio da concentração de radão nesta cave é 212,82 Bq/m<sup>3</sup>, valor inferior aos 400 Bq/m<sup>3</sup> sugeridos como valor a partir do qual é recomendado uma intervenção em habitações pela legislação portuguesa.

Na tabela 5.3 é possível verificar que 61,5 % das medições efectuadas apresentam valores inferiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>, 84,2 % são inferiores a 400 Bq/m<sup>3</sup> e 93,6 % são inferiores a 600 Bq/m<sup>3</sup>. 6,4 % do total das medições efectuadas apresentam valores superiores a 600 Bq/m<sup>3</sup>.

Tabela 5.3 - Frequências relativas obtidas para determinados intervalos de concentração de <sup>222</sup>Rn excluindo os dados relativos ao teste realizado.

Intervalos de Concentração de <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Nº de Ciclos	Frequências Relativas (%)
0 - 200	547	61,5
200 – 400	202	22,7
400 - 600	84	9,4
600 - 1100	57	6,4

O dióxido de carbono corresponde a um gás que, à semelhança do radão, é incolor, inodoro e mais denso que o ar. Este gás funciona como um asfixiante e os sintomas da exposição a diferentes concentrações de dióxido de carbono estão sintetizados na tabela 5.4.

A análise das variações temporais da concentração de dióxido de carbono (Figs. 5.3 e 5.4) evidencia que este gás apenas representa um problema em termos de saúde quando a ventilação é nula. Tal apenas se verificou no período correspondente ao teste dos dias 7 a 9 de Dezembro quando o valor da concentração deste gás

atingiu os 6 %vol. No restante período em que decorreu a recolha de dados o valor máximo de concentração de dióxido de carbono foi igual a 0,2 %vol.

Tabela 5.4 – Efeitos e limites de exposição médios para o CO<sub>2</sub> considerando adultos saudáveis (adaptado de Viveiros, 2003).

Concentração (%)	Tempo de exposição	Efeitos	Observações
0,033			Ar atmosférico
0,5	8 h diárias em ambiente de trabalho		Limite de exposição admissível (PEL – Permissible Exposure Limit)
0,5 a 3,0	Algumas horas	Dificuldade em respirar. Aumento do ritmo cardíaco. Dores de cabeça.	
3,0	15 minutos		Limite de exposição para um curto período (STEL – Short-Term Exposure Limits)
	> 15 minutos	100% aceleração da respiração. Dores de cabeça. Fraqueza muscular.	
5,0		300% aceleração da respiração. Dores de cabeça: Fraqueza muscular. Depressão nervosa. Vómitos. Tonturas. Ruído nos ouvidos. Sonolência.	
10,0	Alguns minutos	Inconsciência. Recuperação rápida dos indivíduos quando colocados em ambiente ventilado.	
> 12,0		Rápida inconsciência. Morte.	

#### 5.4.4. Mitigação do Risco

Em termos gerais, em qualquer casa que apresente níveis de radão acima do recomendado, deverão ser tomadas as seguintes medidas (Hasbrouck, 1983):

- (a) descobrir a fonte provável de radão;
- (b) seleccionar a medida de mitigação mais eficaz;
- (c) avaliar se a redução do risco em termos de saúde justifica o custo da medida de mitigação.

Algumas das medidas mitigadoras a aplicar em habitações, dependendo do tipo de fonte de radão, encontram-se já definidas. No caso em estudo, se a entrada de radão estivesse relacionada com a sua dissolução na água então a solução deste problema passaria pela utilização de sistemas de arejamento desenhados para a sua remoção da água ou através de unidades de tratamento de água de carbono activo (Hasbrouck, 1983). No primeiro caso, são injectadas bolhas de ar na água de modo a que o radão dissolvido passe para a atmosfera, no segundo caso, quando a água passa pelo filtro a superfície de carbono activo atrai e acumula o radão removendo-o da água (Vitaliano, 2003). A segunda medida seria a mais aconselhável uma vez que a primeira iria favorecer o aumento da concentração de radão no ar da habitação. Se o problema residisse no tipo de material de construção utilizado a solução passaria por uma ventilação eficiente e pela utilização de uma tinta isoladora. Se a entrada de radão estivesse relacionada com diferenças de pressão existentes entre o interior e o exterior da habitação as soluções passariam, por exemplo, pela construção de caixas-de-ar, pelo preenchimento de fendas com uma tinta isoladora (Hasbrouck,

1983) ou ainda pela aplicação de um sistema de pressurização da habitação ou de despressurização da caixa-de-ar (Paridaens *et al.*, 2005).

Como no caso da habitação seleccionada neste trabalho, a principal fonte para a presença de radão na habitação é o solo, e os pontos de entrada deste gás na habitação correspondem a fendas e fissuras existentes nas paredes e no chão. A solução neste caso poderia passar por (1) vedar as fendas com uma tinta isoladora e (2) uma ventilação eficiente. No entanto, e uma vez que se trata de uma cave onde os ocupantes desta habitação apenas vão lá esporadicamente e não permanecem muito tempo neste espaço, a presença da caixa-de-ar, as seis janelas e a porta existentes parecem ser suficientes para a ocorrência de uma ventilação eficaz que permita manter os valores de concentração de dióxido de carbono e radão em níveis aceitáveis sem grandes custos. No entanto, este trabalho vem realçar a importância de se ter em consideração a cartografia de desgaseificação difusa, nesta freguesia, aquando da expansão do parque habitacional.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás nobre incolor, inodoro e radioactivo resultante do decaimento do urânio ( $^{238}\text{U}$ ). Sendo o único elemento gasoso desta série radioactiva é o que possui maior mobilidade, pelo que pode ser libertado das rochas para outros meios líquidos ou gasosos, como a água, espaços intersticiais, quer em rochas quer no solo, ou ainda o ar atmosférico (Spencer, 1992; Hasbrouck, 1983).

Nas regiões vulcânicas, os estudos de desgaseificação difusa de radão no solo podem fornecer importantes informações sobre fenómenos que ocorrem em profundidade, nomeadamente no que concerne a identificação de falhas ocultas, a prospecção geotérmica e a monitorização sismovulcânica.

O Vulcão das Furnas é um dos vulcões centrais activos da ilha de S. Miguel e corresponde a um aparelho de composição essencialmente traquítica (Guest *et al.*, 1999). A desgaseificação neste aparelho vulcânico é significativa não se resumindo à existência de campos fumarólicos e de nascentes termais e de água fria gaseificada, contemplando também uma importante área de desgaseificação difusa.

O presente trabalho envolveu estudos sobre o  $^{222}\text{Rn}$  ao nível de desgaseificação difusa no Vulcão das Furnas que abrangeu a cartografia de solos, a monitorização contínua e a monitorização ambiental. O equipamento utilizado possui

um detector sólido, que converte a radiação  $\alpha$  num sinal eléctrico, e um espectrómetro de partículas  $\alpha$ .

Os trabalhos de cartografia envolveram a amostragem de 175 pontos seleccionados de forma aleatória numa área de 2,76 km<sup>2</sup>, repartidos por 3 campanhas que decorreram entre Julho e Novembro de 2005. Sempre que foram encontrados valores da humidade superiores a 10 % foi necessário repetir a amostragem, conduzindo a atrasos no desenrolar dos trabalhos, uma vez que, os valores obtidos nestas condições encontravam-se subavaliados. Adicionalmente, a temperatura no solo foi medida em cada local onde foi feita a amostragem da concentração de radão.

Os valores da concentração de radão no solo oscilaram entre os 45,9 Bq/m<sup>3</sup> e os 110808 Bq/m<sup>3</sup>, sendo o valor médio 6702 Bq/m<sup>3</sup>. Por outro lado, os valores da temperatura do solo oscilaram entre os 16,5 e os 100 °C, sendo a sua média 24,6 °C. Durante o período de tempo em que decorreram os trabalhos verificou-se, através da análise dos factores meteorológicos fornecidos pela estação GFUR1, que as várias campanhas decorreram sob condições meteorológicas semelhantes e como tal os dados obtidos não se encontram sujeitos a grandes oscilações decorrentes das variações externas. Apenas os valores de temperatura do solo relativos ao mês de Novembro apresentam um ligeiro decréscimo relacionado com o abaixamento sazonal da temperatura e o aumento da pluviosidade ao longo do período de amostragem conduziu ao aumento do teor de humidade no solo.

A projecção dos dados de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  log-transformados no gráfico de frequências acumuladas permitiu identificar os  $2000 \text{ Bq/m}^3$  como valor limite para o ruído de fundo na área cartografada. No entanto, as anomalias encontradas começam a sobressair a partir de  $12000 \text{ Bq/m}^3$ . A distribuição espacial dos valores de concentração de radão no solo permitiu identificar 14 zonas anómalas e traçar alinhamentos de direcção E-W, NE-SW e E-W a WNW-ESE. Os resultados obtidos, quando comparados com estudos anteriores, nomeadamente com a cartografia de anomalias da concentração de  $\text{CO}_2$  no solo (Sousa, 2003), permitem observar a existência de zonas anómalas comuns. Contudo verificam-se também zonas de anomalias específicas de cada gás: no caso das zonas anómalas comuns, estas podem resultar do facto do  $\text{CO}_2$  poder funcionar como gás de arraste em relação ao radão e da influência da presença do reservatório hidrotermal; as zonas anómalas observadas apenas na cartografia de radão podem estar relacionadas com o facto deste gás poder ser transportado por outro gás ou pela água; as zonas anómalas existentes apenas na cartografia de  $\text{CO}_2$  podem ser resultado das diferentes malhas utilizadas ou ainda da dissolução e transporte do  $^{238}\text{U}$  na água como é, provavelmente, o caso do campo fumarólico da freguesia das Furnas. Em relação aos alinhamentos traçados, estes não são muito distintos dos de Sousa (2003) e apresentam direcções similares a alguns acidentes tectónicos definidos por Gaspar *et al.* (1995) e a algumas orientações das anomalias de *Bouguer* definidas por Montesinos *et al.* (1999).

No que concerne à cartografia de anomalias térmicas foram identificadas 3 zonas anómalas cujos valores de temperatura do solo são superiores a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Quando comparada com a cartografia realizada por Sousa (2003) a área da anomalia térmica,

aqui apresentada, é maior devido provavelmente à correcção anual da temperatura efectuada. O referido autor identifica seis zonas anómalas ( $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), sendo três delas coincidentes com as identificadas neste trabalho, podendo as restantes não ter sido identificadas como resultado das diferentes malhas utilizadas.

A monitorização contínua de radão no solo decorreu num período compreendido entre 18 de Agosto e 17 de Dezembro de 2005. Teve como objectivo comparar as variações na concentração de  $^{222}\text{Rn}$  com as de fluxo de  $\text{CO}_2$  no solo fornecidas pela estação GFUR1. Os valores da concentração de radão no solo oscilaram entre os 0 e os  $35308,28\text{ Bq/m}^3$ , sendo os valores médios da ordem dos  $17905,71\text{ Bq/m}^3$ . Para a interpretação das variações observadas utilizaram-se igualmente os dados meteorológicos da estação GFUR1, no sentido de se perceber quais os factores atmosféricos que influenciam a concentração deste gás no solo.

Verificou-se que os factores que mais parecem influenciar os valores de concentração de radão são a pressão barométrica, a pluviosidade e a humidade no solo. A pressão barométrica exerce uma influência inversa na variação da concentração de radão. Por outro lado, a pluviosidade e a humidade no solo parecem exercer uma influência directa. Esta relação pode ser explicada pelo facto do incremento da pluviosidade e, conseqüentemente, da humidade do solo, impedir a libertação de gases para a atmosfera, uma vez que todos os espaços livres são preenchidos por água. A presença de água conduz, por um lado, à dissolução do radão e, por outro, à retenção deste gás em zonas mais profundas do solo. Essa retenção promove um aumento da concentração de radão em zonas mais profundas

do solo que é detectada pelo facto do ponto de amostragem não ser superficial mas estar situado, no caso presente, à profundidade de 80 cm. Assim, verifica-se que a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no solo acompanha de um modo geral as variações de fluxo de  $\text{CO}_2$  registadas no mesmo local.

Na monitorização ambiental teve-se em atenção a análise do perigo de  $^{222}\text{Rn}$  existente no interior de algumas habitações nas Furnas uma vez que este isótopo é considerado como cancerígeno. Para o efeito seleccionou-se uma habitação construída nas proximidades de uma das anomalias de  $^{222}\text{Rn}$  mais importantes. O local de amostragem escolhido foi a cave da habitação. Paralelamente, efectuaram-se medições da concentração de dióxido de carbono, com um espectrómetro de infravermelhos.

A amostragem contínua da concentração de radão na habitação decorreu num período compreendido entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005. Os valores máximos, 13272,91 Bq/m<sup>3</sup> no caso da concentração de radão e 6 %vol. no caso da concentração de dióxido de carbono, foram obtidos durante o teste promovido. Com o objectivo de se analisar a influência das variações dos factores atmosféricos na concentração de radão, recorreu-se novamente aos dados dos sensores adicionais da estação fixa de fluxo de  $\text{CO}_2$  (GFUR1).

Observou-se que a concentração de radão na cave da habitação está directamente relacionada com a ventilação existente, a qual depende da velocidade do vento e dos hábitos dos residentes. Assim, sempre que ocorre uma diminuição da

velocidade do vento ou sempre que os residentes fecham as janelas em períodos de maior agravamento das condições meteorológicas, provocam uma diminuição da ventilação o que conduz ao incremento da concentração de radão e de dióxido de carbono na cave.

Tendo em conta os valores obtidos, facilmente se conclui que, na ausência de arejamento adequado, as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nesta cave frequentemente ultrapassam os  $200 \text{ Bq/m}^3$  recomendados como limite máximo em habitações por Organizações Internacionais (CEC, WHO) e os  $400 \text{ Bq/m}^3$  recomendados na legislação portuguesa, atingindo em casos extremos valores semelhantes aos registados em algumas explorações de urânio. O radão, neste caso de estudo, representa um factor de perigo sempre que a eficiência da ventilação da cave é reduzida, uma vez que a sua concentração neste espaço sofre um incremento atingindo valores frequentemente superiores a  $600 \text{ Bq/m}^3$ . No caso do dióxido de carbono, a sua concentração revela-se preocupante apenas na ausência total de ventilação, situação em que foram registados valores da ordem dos 6 %vol..

Nesta habitação, dada a sua proximidade a uma importante anomalia de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e tendo em conta a relação existente entre as variações da concentração deste gás e as da concentração de  $\text{CO}_2$  no ar ambiente desta cave, a fonte de entrada de  $^{222}\text{Rn}$  é o solo. O facto do chão da cave ser cimentado não constitui um isolamento eficaz, pelo que, este gás pode ser facilmente introduzido neste espaço através de fendas e fissuras existentes no chão e nas paredes. Para além do problema identificado nesta habitação, a proximidade de outras habitações desta freguesia a

zonas de importante desgaseificação difusa de  $^{222}\text{Rn}$ , sugere que este seja um problema que se estenda a outras habitações.

Da realização deste trabalho resultam as seguintes considerações:

- (a) Verifica-se que, no Vulcão das Furnas, ocorre uma significativa desgaseificação difusa de  $^{222}\text{Rn}$  através dos solos.
- (b) A desgaseificação difusa de radão no solo não é uniforme, tendo-se identificado zonas de desgaseificação anómala e alinhamentos de desgaseificação que correspondem, provavelmente, a zonas de falhas.
- (c) A cartografia de  $^{222}\text{Rn}$  apresentada constitui uma situação de referência que pode ser utilizada na monitorização sismovulcânica para comparações futuras.
- (d) A concentração de radão no solo, amostrada em contínuo, é influenciada pelos mesmos factores atmosféricos que influenciam o fluxo de  $\text{CO}_2$  no solo, nomeadamente, pela pressão barométrica, pela pluviosidade e pela humidade no solo.
- (e) Parte das habitações da freguesia das Furnas está implantada sobre ou junto a anomalias de  $^{222}\text{Rn}$  pelo que este gás pode-se acumular no interior de habitações, em concentrações prejudiciais para a saúde. Na habitação

estudada a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  depende directamente da eficácia da ventilação.

- (f) No ordenamento do parque habitacional desta freguesia deverá ser levado em consideração a localização das zonas de desgaseificação difusa e a implementação de medidas de mitigação do risco aquando da construção de habitações, nomeadamente, a construção de caixas-de-ar e de janelas suficientes para possibilitar um arejamento eficaz no piso térreo. A construção de caves não é apropriada nestas áreas.

Importa, assim, continuar a desenvolver trabalhos relacionados com o estudo do radão, neste vulcão, quer no que diz respeito à monitorização sismovulcânica, quer no que se relaciona com questões de saúde pública. Deste modo, sugerem-se como trabalhos futuros:

- (a) Estender a realização da cartografia de anomalias de radão a outras áreas do Vulcão das Furnas (caldeira e flancos). Este trabalho irá permitir a obtenção de cartografia de base de anomalias de radão numa área mais extensa, a identificação de zonas de desgaseificação anómala e de falhas e a identificação de zonas de possível expansão do parque habitacional.
- (b) Determinar a concentração de radão em nascentes e fumarolas. Este trabalho permitirá confirmar se realmente a ausência de radão, no campo fumarólico da freguesia das Furnas, pode ser justificada pela dissolução de

$^{238}\text{U}$  na água. Por outro lado, a sua amostragem periódica contribuirá para a monitorização sismovulcânica deste aparelho.

(c) Prosseguir com a monitorização contínua da concentração de radão no solo e instalar mais estações de radão fixas noutros locais do vulcão. A aquisição de um maior número de dados possibilitará a criação de modelos matemáticos com vista à eliminação da influência de factores meteorológicos e à melhor compreensão dos fenómenos que ocorrem em profundidade.

(d) Prosseguir com a monitorização da concentração de radão em habitações. A realização de testes em habitações, seleccionadas quer especificamente quer aleatoriamente, permitirá conhecer a dimensão deste problema em termos de saúde pública. Possibilitará, ainda, estudar a relação entre a concentração de radão na habitação e no solo. Por outro lado, a instalação de uma estação fixa numa habitação, por um período de tempo mais alargado, permitirá observar as variações anuais da concentração deste gás.

Convém referir que os estudos realizados devem ser complementados e integrados com dados provenientes de outras técnicas Geoquímicas e de monitorização Geofísica e Geodésica no sentido de melhor compreender o comportamento do sistema vulcânico.

---

## BIBLIOGRAFIA

- ALLARD, P. (1983) – The origin of hydrogen, carbon, sulphur, nitrogen and rare gases in volcanic exhalations: evidence from isotope geochemistry. *In* Tazieff, H. e Sabroux, J. (Eds), *Forecasting Volcanic Events*. ELSEVIER, 337-386.
- ALLARD, P.; CARBONNELLE, J.; DAJLEVIC, D.; BRONEC, J.; MOREL, P.; ROBE, M. C.; MAURENAS, J. M.; FAIVRE-PIERRET, R.; MARTINS, D.; SABROUX, J. C. e ZETTWOOG (1991) – Eruptive and diffuse emissions of CO<sub>2</sub> from Mount Etna. *Nature*, Vol. 351.
- AL-TAJ, M.; AL-BATAINA, B. e ATALLAH, M. (2004) – Evaluation of geodynamic activity of the Dead Sea transform fault by radon gas concentrations. *Environmental Geology*, 46, 574-582.
- ANNUNZIATELLIS, A.; CIOTOLO, G.; LOMBARDI, S. e NOLASCO, F. (2003) – Short- and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 77, 93-108.
- AUMENTO, F. (2001) – Radon tides on an active volcanic island (Terceira, Azores). *Paper presented at the 6<sup>th</sup> International Rare Gas Conference, Cuernavaca, México*. Versão on-line in: <http://www.aw-el.com/geo.htm>.
- BACIU, A. C. (2005) – Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania). *Journal of Environmental Radioactivity*, 83, 171-189.
- BALCÁZAR, M.; LÓPEZ, A. e CUAPIO, A. (1990) – Radon as a signal to locate geothermal energy sources. *In* Tommasino, L. (Ed.), *Radon monitoring in radioprotection, environmental radioactivity and earth sciences*, 463-468.

- 
- BAUBRON, J. C.; ALLARD, P.; SABROUX, J.C.; TEDESCO, D. e TOUTAIN, J.P. (1991) – Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of the Geological Society, London*, 148, 571-576.
- BAUBRON, J. C.; BAXTER, P. J. e COUTINHO, R. (1994) – Gas hazards in dwellings of Furnas. 1:2000 map of Furnas. BRGM, France.
- BAXTER, P. J.; BAUBRON, J.-C. e COUTINHO, R. (1999) – Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 95-106.
- BIRCHALL, A. e MARSH, J. W. (2005) – Radon dosimetry and its implication for risk. *International Congress Series*, 1276, 81-84.
- BIRCHARD, G. F. e LIBBY, W. F. (1980) – Soil radon concentration changes preceding and following four magnitude 4.2 – 4.7 earthquakes on the San Jacinto Fault in Southern California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B6, 3100-3106.
- BOGEN, K. T. e CULLEN, J. (2002) – Residential radon in U.S. counties v lung cancer in women who predominantly never smoked. *Environmental Geochemistry and Health*, 24, 229-247.
- BOICE, Jr. J. D. e LUBIN, J. (1997) – Occupational and environmental radiation and cancer. *Cancer Causes and Control*, 8, 309-322.
- BOOTH, B.; WALKER, G.P.L. e CROASDALE, R. (1978) – A quantitative study of five thousand years of volcanism on São Miguel, Azores. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 288, 271-319.
- BRUNKE, E. G.; LABUSCHAGNE, C.; PARKER, B.; SCHEEL, H. E. e WHITTLESTONE, S. (2004) – Baseline air mass selection at Cape Point, South Africa: application of <sup>222</sup>Rn and other filter criteria to CO<sub>2</sub>. *Atmospheric Environment*, 38, 5693-5702.

- 
- CARAPEZZA, M. L. (1996) – Soil gas investigation in volcanic areas. *In* Barberi, F.; Casale, R. e Fantechi, R. (Eds.), *Proceedings of the Course: The Mitigation of Volcanic Hazards*. European Commission, 403-432.
- CARDELLINI, C.; CHIODINI, G.; FRONDINI, F.; GRANIERI, D.; LEWICKI, J. e PERUZZI, L. (2003) – Accumulation chamber measurements of methane fluxes: application to volcanic-geothermal areas and landfills. *Applied Geochemistry*, 18, 45-54.
- CARVALHO, F. C. (1995) – Origins and concentrations of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the surface air at Lisbon, Portugal, at the Atlantic edge of the European continental landmass. *Atmospheric Environment*, Vol. 29, No. 15, 1809-1819.
- CHIODINI, G.; CIONI, R.; GUIDI, M.; RACO, B. e MARINI, L. (1998) – Soil  $\text{CO}_2$  flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13, 543-552.
- CHOUBEY, V. M.; BARTARYA, S. K. e RAMOLA, R. C. (2000) – Rádon in Himalayan springs: a geohydrological control. *Environmental Geology*, 39, 523-530.
- CHYI, L. L.; CHOU, C.; YANG, F. T. e CHEN, C. (2001) – Continuous radon measurements in faults and earthquakes precursor pattern recognition. *Western Pacific Earth Sciences*, Vol. 1, No. 2, 227-246.
- CIOTOLI, G.; ETIOPE, G.; GUERRA, M. e LOMBARDI, S. (1999) – The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys. *Tectonophysics*, 301, 321-332.
- COLE, P. D.; QEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; GASPAR, J. L.; DUNCAN, A. M. e 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.; QEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J. M.; GASPAR, J. L.; FERREIRA, T. e 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.

- 
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC) (1990) - Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon (90/143/Eurotom).
- CONNOR, C.; HILL, B.; LAFEMINA, P.; NAVARRO, M. e CONWAY, M. (1996) – Soil  $^{222}\text{Rn}$  pulse during the initial phase of the June-August 1995 eruption of Cerro Negro, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73, 119-127.
- COUTINHO, R. M. S. (2000) – *Elementos para a Monitorização Sismovulcânica da Ilha do Faial (Açores): Caracterização Hidrogeológica e Avaliação de Anomalias de Rn Associadas a Fenómenos de Desgaseificação*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 343p.
- COX, M. E. (1980) – *Ground radon surveys for geothermal exploration in Hawaii*. A thesis submitted to the graduate division of the University of Hawaii in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Master of Science in Geology and Geophysics, 205p.
- CRUZ, J. V.; COUTINHO, R.; CARVALHO, M. R.; OSKARSSON, N. e GISLASON, S. R. (1999) – Chemistry of waters from Furnas volcano, São Miguel, Azores: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 151-167.
- Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril - Diário da República Nº 67 I Série A.
- DELMELLE, P. e STIX, J. (2000) – Volcanic gases. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 803-815.
- DRAPER, N. e SMITH, H. (1981) – *Applied Regression Analysis*. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley and Sons, Inc., USA, 707p.
- DUNCAN, A. M.; QUEIROZ, G.; GUEST, J. E.; COLE P. D.; WALLENSTEIN, N. e PACHECO, J. M. (1999) – The Povoação Ingnimbrite, Furnas Vulcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 55-65.

- 
- DURRIDGE COMPANY (2000) – *RAD7 radon detector manual*. USA, 77p.
- ETIOPE, G. e MARTINELLI, G. (2002) – Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129, 185-204.
- EUROPEAN COLLABORATIVE ACTION (ECA) (1995) – Indoor air quality and its impact on man: Radon in indoor air. Report N° 15, European Commission, EUR 16123 EN.
- FALKENBACH, A.; KOVACS, J.; FRANKE, A.; JÖRGENS, K. e AMMER, K. (2005) – Radon therapy for the treatment of rheumatic diseases – review and meta-analysis of controlled clinical trials. *Rheumatol Int*, 25, 205-210.
- FERREIRA, T. (1994) – *Contribuição para o estudo das emanações gasosas associadas a processos de vulcanismo no arquipélago dos Açores*. Tese APCC, Universidade dos Açores, 183p.
- FERREIRA, T. e OSKARSSON, N. (1999) – Chemical and isotopic composition of fumarole discharge of Furnas caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 169-179.
- FERREIRA, T. (2000) – *Caracterização da actividade 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.
- FRUTUOSO, G. (1522-1591) – Livro quarto das Saudades da Terra. In Frutuoso, G. “*Saudades da Terra*”. 2ª Ed. Ponta Delgada, 1981, V. II.
- GALLI, G.; MANCINI, C. e QUATTROCCHI, F. (2000) – Groundwater, radon continuous monitoring system ( $\alpha$ -scintillation counting) for natural hazard surveillance. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 407-433.
- GARAVAGLIA, M.; BRAITENBERG, C. e ZADRO, M. (1998) – Radon monitoring in a cave of north-eastern Italy. *Phys. Chem. Earth*, Vol. 9-10, 949-952.

- 
- GARCÍA, R.; NATALE, G.; MONNIN, M. e SIDEL, J. L. (2000) – Shock wave radon surface signals associated with the upsurge of T-P solitons in volcanic systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96, 15-24.
- GARCÍA-TALAVERA, M.; QUINTANA, B.; GARCÍA-DÍEZ, E. e FERNÁNDEZ, F. (2001) – Studies on radioactivity in aerosols as a function of meteorological variables in Salamanca (Spain). *Atmospheric Environment*, 35, 221-229.
- GARCIA-VINDAS, J. R. e MONNIN, M.M. (2005) – Radon concentration measurements in the presence of water and its consequences for Earth sciences studies. *Radiation Measurements*, 39, 319-322.
- GARZÓN, L. e GARZÓN, M. L. (2001) – Radioactivity as a significant energy source in prebiotic síntesis. *Origins of Life and Evolutions of the Biosphere*, 31. Kluwer Academic Publishers, 3-13.
- GASPAR, J. L.; FERREIRA, T.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J.; GUEST, J; DUNCAN, A. e COLE, P. (1995). Evolução morfoestrutural do Vulcão das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores). *Universidade do Porto – Faculdade de Ciências Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Memória nº 4, 999-1003.
- GASPARINI, P. e MANTOVANI, M. S. M. (1978) – Radon anomalies and volcanic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3, 325-341.
- GAUTHIER, P.-J.; LE CLOAREC, M.-F. e CONDOMINES, M. (2000) – Degassing processes at Stromboli volcano inferred from short-lived disequilibria ( $^{210}\text{Pb}$ -  $^{210}\text{Bi}$ -  $^{210}\text{Po}$ ) in volcanic gases. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 1-19.
- GEOTECHNICAL INSTRUMENTS (1996) – *Anagas<sup>TM</sup> CD 95 operating manual*. U.K., 23p.
- GEORGE, A. C. (1990) – An overview of instrumentation for measuring environmental radon and radon progeny. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 37, NO. 2, 892-901.
- GREEMAN, D. J. e ROSE, A. W. (1996) – Factors controlling the emanation of radon and thoron in soils of the eastern U.S.A.. *Chemical Geology*, 129, 1-14.

- 
- GUEST, J. E.; GASPAR, J. L.; COLE, P. D.; QUEIROZ, G.; DUNCAN, A. M.; WALLENSTEIN, N.; FERREIRA, T. e PACHECO, J.-M. (1999) – Volcanic geology of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 1-29.
- HANNA INSTRUMENTS (1997) – Instruction manual HI 93531 Thermometers. Italy, 25p.
- 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. Versão *on-line* in: <http://inferno.asap.um.maine.edu/physics/radiation/radon.htm>.
- HEILIGMANN, M.; STIX, J.; WILLIAMS-JONES, G.; LOLLAR, B. S. e GÁRZON V., G. (1997) – Distal degassing of radon and carbon dioxide on Galeras volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 267-283.
- HERNÁNDEZ, P.; PÉREZ, N.; SALAZAR, J.; REIMER, M.; NOTSU, K. e 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.
- HORVÁTH, Á.; BOHUS, L. S.; URBANI, F.; MARX, G.; PIRÓTH, A. e GREAVES, E. D. (2000) – Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. *Journal of Environmental Radioactivity*, 47, 127-133.
- HUSSEIN, M. I. e HUWAIT, M. R. A. (1999) – Applications of electret and radon-box in the estimation of radon concentration. *16<sup>th</sup> National Radio Science Conference, NRSC'99*, 1-9.
- INAGAKI, M.; NOJIRI, S.; TAKEMURA, T.; KOGA, T.; MORISHIMA, H.; TANAKA, Y.; MIFUNE, M. e KOBAYASHI, I. (2005) – Radon-222 concentrations and the environmental radiation dose rates at Misasa spa districts, Japan. *International Congress Series*, 1276, 293-294.
- JONES, A. J. (1999) – Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33, 4535-4564.

- 
- KATZ, B. G.; CATCHES, J. S.; BULLEN, T. D. e MICHEL, R. L. (1998) – Changes in the isotopic and chemical composition of ground water resulting from a recharge pulse from a sinking stream. *Journal of Hydrology*, 211, 178-207.
- KIES, A.; MAJERUS, J. e D`OREYE DE LANTREMANGE, N. (1999) – Underground radon gas concentrations related to earth tides. *II Nuevo Cimento*, Vol. 22C, N. 3-4. Versão *on-line* in: [http://www.ecgs.lu/html/publications/radon\\_gas.html](http://www.ecgs.lu/html/publications/radon_gas.html).
- KING, C.-Y. (1980) – Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, 3065-3078.
- KING, C.-Y.; KING B.-S.; EVANS, W. C. e ZHANG, W. (1996) – Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, Vol. 11, 497-510.
- KITTO, M. E. (2005) – Interrelationship of indoor radon concentrations, soil-gas flux, and meteorological parameters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 264, No. 2, 381-385.
- KOTRAPPA, P.; DEMPSEY, J. C.; HICKEY, J. R. e STIEFF, L. R. (1988) – An electret passive environmental  $^{222}\text{Rn}$  monitor based on ionisation measurement. *Health Phys.*, vol. 54, 47-56.
- KOZLOWSKA, B.; HETMAN, A. e ZIPPER, W. (1999) – Determination of  $^{222}\text{Rn}$  in natural water samples from health resorts in the Sudety mountains by the liquid scintillation technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 51, 475-480.
- LABRECQUE, J. J.; CORDOVES, P. R.; ROSALES, P. A.; AUDEMARD, F. e ROMERO, G. (2001) – Monitoring of radon anomalies in the Rio Casanay and a thermal spring near the El Pilar fault shortly after the July 9, 1997 earthquake ( $M_w=6,9$ ) in the state of Sucre (Venezuela). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 250, No. 2, 239-245.
- LABRECQUE, J. J. e CORDOVES, P. R. (2003) – Application of the relative uranium-series disequilibrium in soil to locate and/or confirm precisely active fault traces: a new technique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 258, No. 1, 43-48.

- 
- LANDIM, P. M. B. (2000) – *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático 02, 20p. Versão on-line in: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>.
- LANDIM, P. M. B. (2003) – *Análise estatística de dados geológicos*. 2ª Edição, Editora UNESP, São Paulo, 253p.
- LAURIER, D.; TIMARCHE, M.; MITTON, N.; VALENTY, M.; RICHARD, P.; POVEDA, S.; GELAS, J.-M. e QUESNE, B. (2004) – An update of cancer mortality among the French cohort of uranium miners: Extended follow-up and new source of data for causes of death. *European Journal of Epidemiology*, 19, 139-146.
- LÓPEZ, M. G.; SÁNCHEZ, A. M. e ESCOBAR, V. G. (2004) – Application of ultra-low level liquid scintillation to the determination of  $^{222}\text{Rn}$  in groundwater. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 261, No. 3, 631-636.
- LUBIN, J. H.; WANG, Z. Y.; BOICE, JR. J. D.; XU, Z. Y.; BLOT W. J.; WANG, L. D. e KLEINERMAN, R. A. (2004) – Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer*, 109, 132-137.
- MANIKANDAN, N. M.; SELVASEKARAPANDIAN, S.; SIVAKUMAR, R.; RAGHUNATH, V. M.; SUNDARAM, V. M. e SANTHANAM (2002) – Radon and thoron progeny levels in air samples at Udagamandalam region of Nilgiris in India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 252, No. 2, 249-254.
- MARQUES, R. (2004) – *Contribuição para o conhecimento da instabilidade geomorfológica dos Açores: Estudo de movimentos de vertente associados a diferentes mecanismos desencadeantes*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 147p.
- MONNIN, M. e SEIDEL, J. L. (1998) – An automatic radon probe for earth science studies. *Journal of Applied Geophysics*, 39, 209-220.

- 
- MONTESINOS, F. G.; CAMACHO, A. G. e VIEIRA, R. (1999) – Analysis of gravimetric anomalies in Furnas caldera (São Miguel, Azores). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 67-81.
- NISHIZAWA, S.; IGARASHI, G.; SANO, Y.; SHOTO, E.; TASAKA, S. e SASAKI, Y. (1998) – Radon, Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> anomalies in hot spring water associated with the 1995 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula, central Japan. *Applied Geochemistry*, Vol. 13, 89-94.
- OLIVER, M. A. e KHAYRAT, A. L. (2001) – A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil. *Computers & Geosciences*, 27, 939-957.
- OSKARSSON, N.; PÁLSSON, K.; ÓLAFSSON, H. e FERREIRA, T. (1999) – Experimental monitoring of carbon dioxide by low power IR-sensors: soil degassing in the Furnas Volcanic Center, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 181-193.
- PACHECO, J. (1995) – *Caracterização do depósito vulcânico Furnas-C e seu contributo para a análise do hazard associado à actividade do vulcão das Furnas*. Tese PCI, Universidade dos Açores, 128p.
- PARIDAENS, J.; SAINT-GEORGES, L. e VANMARCKE, H. (2005) – Mitigation of a radon-rich Belgian dwelling using subslab depressurization. *Journal of Environmental Radioactivity*, 79, 25-37.
- PILIPOSIAN, G. T. e APPLEBY, P. G. (2003) – A simple model of the origin and transport of <sup>222</sup>Rn and <sup>220</sup>Pb in the atmosphere. *Continuum Mech. Thermodyn*, 15, 503-518.
- PULINETS, S. A.; ALEKSEEV, V. A.; LEGEN`KA, A. D e KHEGAI, V. V. (1997) – Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification. *Adv. Space Res.*, Vol. 20, No. 11, 2173-2176.
- QUEIROZ, G.; GASPAR, J.L.; COLE, P.D.; GUEST, J.E.; WALLENSTEIN, N.; DUNCAN, A.M e PACHECO, J. (1995) – Erupções vulcânicas no Vale das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores) na primeira metade do século XV. *Açoreana*, 8(1): 159-165.

- 
- REIS, E. (1997) – *Estatística Multivariada Aplicada*. Edições Silabo, Lda. 343p.
- SAHOTA, H. S.; RANDHAWA, K. S.; SINGH, M. e SINGH, K. (2005) – Temperature variation of indoor and outdoor radon progeny. *Atmospheric Environment*, 39, 2991-2994.
- SCHRÖDER, C.; FRIEDRICH, K.; BUTZ, M.; KOPPISCH, D. e OTTEN, H. (2002) – Uranium mining in Germany: incidence of occupational diseases 1949-1999. *Int. Arch Occup. Environ Health*, 75, 235-242.
- SCHUMANN, R. R. e GUNDERSEN, L. C. S. (1996) – Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient. *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, S439-S446.
- SELVASEKARAPANDIAN, S.; SIVAKUMAR, R.; MANIKANDAN, N. M.; RAGJUNATH, V. M.; KANNAN, V. e RAJARAM, S. (2002) – A study on the radon concentration in water in Coonoor, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 252, No. 2, 345-347.
- SEMKOW, T. M. (1990) – Recoil-emanation theory applied to radon release from mineral grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 54, 425-440.
- 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, K.; SINGH, M.; SINGH, S.; SAHOTA, H. S. e PAPP, Z. (2005a) – Variation of radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) progeny concentrations in outdoor air as a function of time, temperature and relative humidity. *Radiation Measurements*, 39, 213-217.
- SINGH, S.; KUMAR, A. e SINGH, B. (2005b) – Passive integrating radon studies for environmental monitoring in Hamirpur district, Himachal Pradesh, India using solid state nuclear track detectors. *Radiation Measurements*, 39, 81-85.
- SIVISA (2003) – Carta de Sismicidade dos Açores, no período de 1980 a 2003.

- 
- SOUSA, F. (2003) – *Cartografia de anomalias geoquímicas associadas a processos de desgaseificação difusa no Vulcão das Furnas (S. Miguel, Açores): contribuição para a avaliação de riscos vulcânicos*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 106p.
- SPENCER, J. E. (1992) – *Radon gas – A Geologic Hazard in Arizona*. Arizona Geological Survey. Versão on-line in: <http://www.azgs.gov/DTE-2.htm>.
- STIX, J. e GAONAC`H, H. (2000) – Gás, plume and thermal monitoring. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 1141-1163.
- SUN, H. e FURBISH, D. J. (1995) – Moisture content effect on radon emanation in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 18, 239-255.
- SWAKÓN, J. ; KOZAK, K.; PASZKOWSKI, M.; GRADZINSKI, R., LOSKIEWICZ, J.; MAZUR, J.; JANIK, M.; BOGACZ, J.; HORWACIK, T. e OLKO, P. (2005) – Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the Krakow area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78, 137-149.
- TALWANI, P.; MOORE, W. S. e CHIANG, J. (1980) – Radon anomalies and microearthquakes at Lake Jocassee, South Carolina. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B6, 3079-3088.
- TENG, T.-L. (1980) – Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B6, 3089-3099.
- THOMAS, D. M. (1989) – Radon gas as a tracer for volcanic processes. In: TOMMASINO, L.; FURLAN, G.; KHAN, H. A. e MONNIN (Eds.). *Proceedings of the International Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earthsciences*. ICTP, Trieste, Italy. World Scientific, 295-314.
- TÓTH, E.; DEAK, F.; GYURKÓCZA, C. S.; KASZTOVSZKY, Z. S.; KUCZI, R.; MARX, G.; NAGY, B.; OBSERSTEDT, S.; SAJÓ-BOHUS, L.; SÜKÖSD, C. S.; TOTH, G. e VAJDA, N. (1997) – Radon variations in a Hungarian village. *Environmental Geology*, 31 (1/2), 123-127.

- 
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR) (1993) – Sources and effects of ionizing radiation, report to the General Assembly. United Nations, New York.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (1999) – National primary drinking water regulations; Radon-222. Volume 64, Nº 211, 59245-59294. Versão on-line in: <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WATER/1999/November/Day-02/>.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2002) - A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family From Radon, 4<sup>th</sup> ed., EPA 402-K-02-006, 15p.
- VITALIANO, D. F. (2003) – Costs and benefits of mitigating radon in drinking water. *Public Works Management & Policy*, Vol.7, No. 4; 291-303.
- VIVEIROS, F. (2003) – *Contribuição para o estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores no âmbito da monitorização sismovulcânica e da avaliação do risco: discriminação de factores que influenciam a variação de fluxo de CO<sub>2</sub>*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 140p.
- VORONOV, A. N. (2004) – Radon-rich waters in Russia. *Environmental Geology*, 46, 630-634.
- WAKITA, H; NAKAMURA, Y; NOTSU, K.; NOGUCHI, M. e ASADA, T. (1980) – Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkain earthquake (reports). *Science*, Vol. 207, 882-883.
- WALLENSTEIN, N. (1999) - *Estudo da história recente e do comportamento eruptivo do vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores). Avaliação preliminar do hazard*. Tese de doutoramento, Universidade dos Açores, 266 p.
- WICHMANN, H. E.; ROSARIO, A. S.; HEID, I. M.; KREUZER, M.; HEINRICH, J. e KREIENBROCK, L. (2005) – Lung cancer risk due to radon in dwellings – evaluation of the epidemiological knowledge. *International Congress Series*, 1276, 54-57.

- 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.; e RYMER, H. (2000) – Hazards of volcanic gases. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 997-1004.
- WILLIAMS-JONES, G.; STIX, J.; HEILIGMANM, M.; CHARLAND, A.; LOLLAR, B. S.; ARNER, N.; GARZÓN V., G.; BARQUERO, J. e FERNANDEZ, E. (2000) – A model of diffuse degassing at three subduction-related volcanoes. *Bull Volcanoll*, 62, 130-142.
- WINKLER, R. (1997) – Seasonal variation of natural and artificial radionuclide concentrations in ground-level air. *Naturwissenschaften*, 84, 535-539.
- WOLLENBERG, H. A.; SMITH, A. R.; MOSIER, D. F.; FLEXSER, S. e CLARK, M. (1985) – Radon-222 in groundwater of the Long Valley Caldera, California. *PAGEOPH*, Vol. 122, 327-339.
- WYSOCKA, M.; KOTYRBA, A.; CHALUPNIK, S. e SKOWRONEK, J. (2005) – Geophysical methods in radon risk studies. *Journal of Environmental Radioactivity*, 82, 351-362.
- YARAR, Y.; GÜNAYDI, T. e KAM, E. (2005) – A radon survey in some regions of Turkey. *International Congress Series*, 1276, 385-386.
- ZHUO, W.; FURUKAWA, M.; GUO, Q. e KIM, Y. S. (2005) – Soil radon flux and outdoor radon concentration in East Asia. *International Congress Series*, 1276, 285-286.