



**EMISSÕES DE RADÔNIO EM SOLOS E AR DE RECINTOS FECHADOS NA  
REGIÃO DO GRANITO VIAMÃO, PORTO ALEGRE, RS**

Porto Alegre, 2015

**PAULO HENRIQUE PRADO STEFANO**

**EMISSÕES DE RADÔNIO EM SOLO E AR DE RECINTOS FECHADOS NA  
REGIÃO DO GRANITO VIAMÃO, PORTO ALEGRE, RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadora:** Prof. Jaqueline Ozório Chies

**Supervisor:** Prof. Dr. Ari Roisenberg

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Stefano, Paulo Henrique Prado

Emissões de radônio em solo e ar de recintos fechados na região do Granito Viamão, Porto Alegre, RS . / Paulo Henrique Prado Stefano. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015.  
[59 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es): Jaqueline Ozório Chies  
Coorientador(es): Ari Roisenberg

1. Radônio 2. Radiação 3. Câncer 4. Granito Viamão I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

---

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho de conclusão de curso “emissões de radônio em solos e ar de recintos fechados na região do Granito Viamão, Porto Alegre, RS”, elaborado por “Paulo Henrique Prado Stefano” como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Dra. Ana Maria Xavier

---

Prof. Dr. Norberto Dani

---

Prof. Dra. Teresinha Guerra

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo apoio incondicional.

À Ana Carolina, por todo o apoio durante o projeto.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em especial a Dra. Ana Maria Xavier, pelo empréstimo dos equipamentos para a realização deste projeto, e por toda atenção dedicada.

Aos Professores Jaqueline Osório e Ari Roisenberg pela atenção e dedicação.

Aos colegas de pesquisa Ana Julia Bregolin e Glauber Giuliani por todas as discussões e aprendizado.

Aos colegas de MEV Eduardo, Thaniele e Mariana.

Ao Físico Carlos Lima, por todos os ensinamentos passados ao longo do ano.

Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

“Não te irrites, por mais que te fizerem...  
Estuda, a frio, o coração alheio.  
Farás, assim, do mal que eles te querem,  
Teu mais amável e sutil recreio...”

Mario Quintana

## RESUMO

O radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás nobre que aparece na natureza oriundo do decaimento radioativo da série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e ascende até a superfície através de fraturas e poros de rochas e solos ou com a água subterrânea. Elevadas concentrações de radônio no ar ambiente são responsáveis por riscos ao desenvolvimento de câncer nas vias respiratórias e, também, do aparelho digestivo, quando ingerido em água. No presente estudo foram realizadas análises de  $^{222}\text{Rn}$  no solo e no ar em diversos locais abrangidos pelo Granito Viamão em Porto Alegre, com o objetivo de investigar as concentrações deste elemento nos compartimentos compreendidos pelo solo e pelo ar ambiente. A unidade correspondente ao Granito Viamão é classificada petrograficamente como monzogranítica, com alguns termos granodioríticos, tendo como mineralogia essencial K-feldspato, plagioclásio, quartzo e biotita. A radiação presente nesta rocha é decorrente, provavelmente da presença de minerais acessórios, em especial, zircão, apatita, monazita, esfeno e allanita. O estudo realizado utilizou a combinação de vários métodos analíticos, tais como difratometria de raios-x na fração argila dos solos, análise granulométrica, análise gamaespectométrica e análises da concentração de radônio utilizando equipamento Sarad RTM 1688-2 para solos e detectores CR39 para o ar de recintos fechados. Os Solos analisados possuem em média 30% de teor de partículas finas, sendo que as argilas presentes são constituídas por caulintas, illitas e localmente, esmectitas. A concentração de radônio nos solos abrange valores entre 800 e 11000 Bq/m<sup>3</sup>. A concentração de radônio no ar dos recintos analisados atingiu um máximo de 103 Bq/m<sup>3</sup>, valor menor que o estabelecido como máximo permitido pela Agência Internacional de Energia de 300 Bq/m<sup>3</sup>. Sugere-se a continuidade dos estudos sobre radônio na região, abrangendo outras litologias aflorantes no Município de Porto Alegre. Além disso, é importante que ocorra um monitoramento de radiação pelas autoridades locais responsáveis pela gestão pelo gerenciamento ambiental, tendo em vista os efeitos nocivos da inalação de radônio à saúde humana.

Palavras-Chave: Radônio, Radiação, Câncer, Granito Viamão.

## ABSTRACT

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) is a gas that occurs in nature from the radioactive decay of uranium ( $^{238}\text{U}$ ) and rises to the surface through fractures in rocks, rocks porosity or groundwater. High concentrations of this element in the air of closed environments are associated to the risk of developing lung cancer. In this study, was measured the concentration of  $^{222}\text{Rn}$ , in soils and air in different locations of the Viamão Granite, Porto Alegre.—The Viamão Granite is classified as a monzogranite with some granodioritic parts and its essential mineralogy consists in K-feldspar, plagioclase, quartz and biotite. The radiation in granitic rocks, as the Viamão Granite, comes probably from the accessory minerals as zircon, apatite, monazite and allanite. The present study has used a combination of different techniques as X ray diffraction, granulometric analyses, gamma ray spectrometry, Sarad 1688-2 to measure radon in soils and CR-39 detectors to get the radon concentration in air of closed environments. The soil samples analyzed show about 30% of fine particles, and the composition of the clay particles consists in kaolinite, illite, and smectite. The concentration of radon in soils has a range of 800 to 11000 Bq/m<sup>3</sup>. In addition, the radon concentration in air of closed environments has reached a maximum value of 100 Bq/m<sup>3</sup> which is below the maximum value allowed from International Atomic Energy Agency (300 Bq/m<sup>3</sup>). Finally, it is suggested to conduct further study of radon in the region, including other lithologies in the city. It is important that the authorities responsible for the management of environment pay attention in radon concentrations since this element can be responsible for harmful effects to human health.

Key Words: Radon, Radiation, Cancer, Viamão Granite

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Série de decaimento do $^{238}\text{U}$ .....	4
Figura 2 - Localização do Município de Porto Alegre (modificado de Fianco <i>et al.</i> , 2012) .....	10
Figura 3 - Mapa geológico da região de Porto Alegre, RS. (Fonte: Hasenack <i>et al.</i> ,2008) .....	12
Figura 4 - Textura Porfírica do Granito Viamão (Fonte: Hasenack <i>et al.</i> , 2008). ....	13
Figura 5 - Mapa de solos da região do Município de Porto Alegre (Fonte: Hasenack <i>et al.</i> , 2008) .....	15
Figura 6 - Equipamento RS-125 Super GAMMA-RAY SPECTROMETER.....	18
Figura 7 - Detectores de radiação tipo CR39 instalados no campo. (Foto de Santos, 2008) .....	19
Figura 8 - Equipamento de banho térmico da marca Quimis, modelo Q-251, utilizado para o banho térmico.....	21
Figura 9 - Detector CR39 após o ataque químico, apresentando um campo de contagem de uma mina de fluorita (Fonte: Santos, 2008).....	23
Figura 10 - Equipamento SARAD RTM 1688-2.....	26
Figura 11 - Sonda acoplada do aparelho Sarad para análise de radônio em solos. .	27
Figura 12 - Representação esquemática do equipamento SARAD para coleta de dados em solos. ....	27
Figura 13 - Jogo de peneiras utilizado para análise granulométrica. ....	29
Figura 14 - Difratômetro de Raios X SIEMENS BRUKER AXS, modelo D5000 do Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Geociências da UFRGS. ....	31
Figura 15 - Relação dos pontos amostrados com gamaespectrômetro e suas respectivas concentrações.....	34
Figura 16 - Concentração de radônio nos 16 pontos amostrados com o equipamento Sarad 1688-2.....	35

Figura 17- Mapa da concentração de radônio na região do Granito Viamão. ....	36
Figura 18 - Difratoograma de Raios-X do Ponto 1. Legenda: illita (I) e caulinitas (K). .	38
Figura 19 - Difratoograma de Raios-X do Ponto 5. Legenda: Esmeclitas (S), illita (I) e caulinitas (K).....	38
Figura 20 - Teor de finos das amostras analisadas.....	40
Figura 21 - Concentração de radônio vs. teor de finos nos solos.....	40
Figura 22 - Concentração de radônio no ar ambiente dos pontos analisados.....	42
Figura 23 - Traços microscópicos encontrados no detector C3. ....	42

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Concentração de urânio (ppm) em diferentes litologias. ....	5
Tabela 2 - Concentração de radônio em residências em diversos países e os níveis para tomada de ações.....	8
Tabela 3 - Resultados do levantamento gamaespectrométrico realizado na região. ....	33
Tabela 4 – Concentração de radônio e localização dos pontos de análise de solos.....	35
Tabela 5 – Localização dos pontos de amostragem e composição dos argilominerais em solos residuais do Granito Viamão com as respectivas concentrações de radônio. ....	37
Tabela 6 – Localização dos pontos de amostragem e resultado da análise granulométrica em solos residuais do Granito Viamão. ....	39
Tabela 7 - Localização dos detectores CR-39 instalados e concentração de radônio correspondente. ....	41

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Caracterização do Problema/Hipóteses	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos gerais	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
2.1 Considerações Iniciais sobre o radônio	3
2.2 Características da Emissão de Radônio	6
2.3 Relação Radônio e Saúde	7
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO</b>	<b>10</b>
3.1 Localização e Dados do Município	10
3.2 Geologia da Região	11
3.3 Solos da Região	14
<b>4. METODOLOGIA ANALÍTICA</b>	<b>17</b>
4.1. Gamaespectrometria	17
4.2 Detectores de Radiação no Ar	19
4.2.1 Cuidados na Montagem e Instalação dos Detectores CR-39	20
4.2.2 Solução de KOH e ataque químico	21
4.2.3 Contagem dos Traços	22
4.3 Análise de radônio no solo com equipamento Sarad RTM 1688-2	24
4.3.1 Erro Estatístico	24
4.3.2 Previsão de Erro	25
4.3.2 Cuidados Necessários	28

4.4 Análise Granulométrica do Solo	28
4.5 Análises por Difractometria de Raios-X	29
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>32</b>
5.1 Levantamento Gamaespectrométrico	32
5.2 Análises de Radônio em Solos	34
5.3 Composição da fração de argilominerais nos solos	37
5.4 Análise Granulométrica dos Solos	39
5.5 Concentração de Radônio no Ar de Ambientes Fechados	41
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>44</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Caracterização do Problema/Hipóteses

O radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás nobre que aparece na natureza oriundo do decaimento radioativo da série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ). As rochas que possuem este elemento o emitem continuamente para o ambiente. Estudos da United States Environmental Protection Agency, USEPA, (1999) indicam que altos índices de radônio no ambiente são responsáveis por apresentar riscos à saúde da população. O radônio pode ser prejudicial à saúde quando inalado ou quando consumido em água. O elemento em questão é responsável por cerca de 21.000 casos de câncer de pulmão no mundo, por ano, sendo ultrapassado apenas pelo tabaco.

Devido às propriedades geoquímicas do radônio, rochas graníticas com afinidades alcalinas e rochas feldspatídicas são as mais propícias a terem elevados teores deste elemento. Nessas rochas, o radônio normalmente está presente em minerais acessórios, como zircão, apatita, monazita, esfero, entre outros.

A Agência Internacional de Energia Atômica (2014) estabeleceu que a concentração máxima de radônio em ar em ambientes fechados é de  $300 \text{ Bq/m}^3$ . De acordo com estudos preliminares realizados (Fianco *et al.*, 2012), acredita-se que na região do Granito Viamão serão encontrados valores expressivos de radônio principalmente em solos, mas também em residências na região. Por esta razão, torna-se importante conhecer as concentrações deste gás na região onde aflora o Granito Viamão em Porto Alegre, e se necessário, criar medidas preventivas de proteção da saúde da população que vive na área.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos gerais**

O trabalho tem como meta estabelecer dados sistemáticos da concentração de radônio nos solos e no ar de recintos fechados na região do Granito Viamão em Porto Alegre fornecendo resultados que permitam difundir o conhecimento sobre a importância do estudo deste elemento, potencialmente nocivo em áreas urbanas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Analisar o conteúdo de radônio com o objetivo de entender a distribuição deste elemento no solo e no ar de recintos fechados em diferentes zonas do Granito Viamão.
  
- Comparar a eficiência dos métodos analíticos utilizados no estudo, em particular a relação entre os resultados de gamaespectrometria com os métodos diretos de análise de radônio.
  
- Comparar os resultados obtidos no presente estudo com estudos preliminares realizados na região do Município de Porto Alegre.
  
- Comparar os resultados obtidos com os valores de referência adotados pela Agência Internacional de Energia Atômica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### *2.1 Considerações Iniciais sobre o radônio*

O radônio (Rn) é um gás nobre que possui número atômico 86, encontrando-se na natureza em minerais, dissolvido em águas subterrâneas ou livre na atmosfera, sendo formado a partir do decaimento radioativo da série do  $^{238}\text{U}$  (Figura 1). Existem na natureza três isótopos naturais de radônio, o  $^{222}\text{Rn}$  ou radônio,  $^{220}\text{Rn}$  ou torônio e  $^{219}\text{Rn}$  ou actinônio. Esses três isótopos de radônio são oriundos do decaimento radioativo de isótopos de rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  e  $^{223}\text{Ra}$ ) (Ferronsky e Polyakov, 2012). O radônio 219 ( $^{219}\text{Rn}$ ) apresenta um tempo de meia-vida de apenas 3,92 segundos, limitando sua ocorrência e abundância na atmosfera (Appleton, 2005). O tempo de meia vida do  $^{220}\text{Rn}$  é de 56 segundos, enquanto a meia vida do  $^{222}\text{Rn}$  é de 3,82 dias. O  $^{222}\text{Rn}$  é o mais abundante dos isótopos deste elemento na natureza, razão pelo qual é o isótopo que possui maior número de trabalhos na literatura. Além disso, o  $^{222}\text{Rn}$  pode ser transportado por maiores distâncias do que os outros isótopos do mesmo elemento (Appleton, 2005).

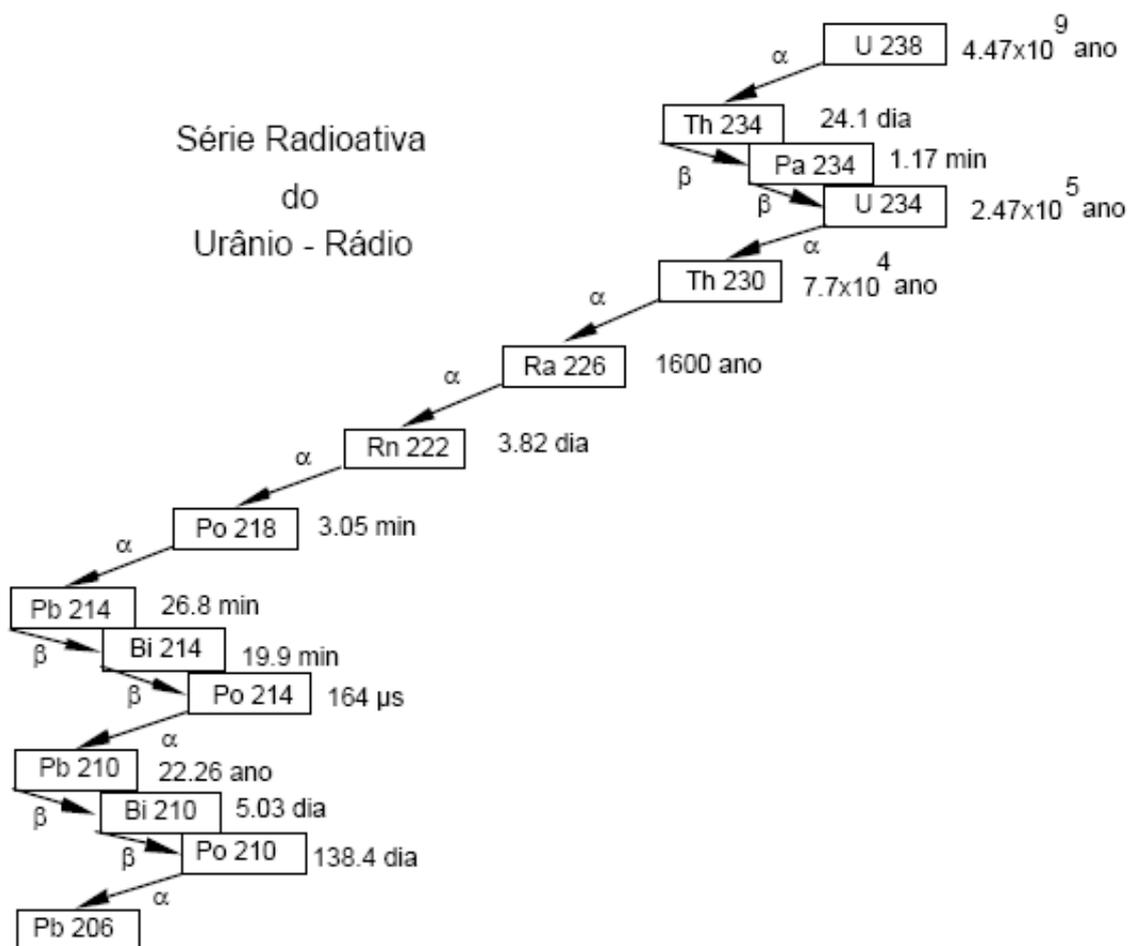


Figura 1 - Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (Modificado de Tanner, 1978).

Os níveis de radônio no ar estão relacionados diretamente com a litologia da região. As rochas que contêm urânio em sua estrutura emitem continuamente este elemento para a atmosfera. Em geral, as rochas metamórficas, granitos, folhelhos carbonosos, e as rochas carbonáticas e fosfáticas com altas concentrações de urânio e rádio são as que apresentam maiores concentrações deste elemento (Tabela 1). O urânio nas rochas ígneas encontra-se, principalmente, em maior concentração nas rochas intrusivas como sienitos alcalinos, granitos alcalinos e granodioritos (Appleton, 2005).

Tabela 1 – Concentração de urânio (ppm) em diferentes litologias.

<b>ROCHAS ÍGNEAS</b>	Urânio (ppm)	<b>ROCHAS SEDIMENTARES</b>	Urânio (ppm)
Graníticas	4,19	Arenitos	1,48
Gabróides	0,84	Arcóseos	1,5
Ultramáficas	0,022	Folhelhos	3,25
Eclogitos	0,2	Calcários	2,19
Intrusivas alcalinas	9,82	Dolomitos	0,03 – 2
Extrusivas silicáticas	5	Fosfáticas	50 – 300
Basálticas	0,43	Evaporitos	< 0,1
<b>ROCHAS METAMÓRFICAS</b>		Urânio (ppm)	
Anfibolito		3,5	
Gnaisse		2,2	
Paragnaisse		4,5	
Granulito		4,9	
Ortognaisse		3,6	
Cordierita Gnaisse		5,8	
Mármore		0,17	
Filito		1,9	
Xisto		2,5	
Rochas Máficas		3,2	

(Fonte: Modificado de Duarte, 2002)

O radônio é o único elemento gasoso nas séries de decaimento radioativo do urânio e do tório, sendo naturalmente gerado. Ferronsky e Polyakov (2012) destacam que ambientes fechados e com baixa ventilação são importantes na acumulação de radônio.

A concentração dos isótopos de radônio em solos depende das propriedades físicas dos mesmos. A velocidade com a qual o radônio se desloca no solo é controlada, principalmente, pela granulometria do solo e pela quantidade de água presente entre os grãos. De maneira geral, solos grossos favorecem o escape do radônio para o ambiente. Em contrapartida, solos argilosos tendem a reter o

radônio, e, por consequência, inibem a migração do gás (Duarte, 2002, Fianco *et al.*, 2012).

## **2.2 Características da Emissão de Radônio**

Os isótopos de radônio são liberados quando o rádio decai por meio de emissão alfa. Os principais fatores que determinam a saída do radônio do meio no qual se encontra são a localização do átomo de rádio no grão mineral, a densidade do meio e a direção que o átomo de radônio assume no momento da sua emissão. Se o átomo de rádio encontra-se localizado em uma região muito interna na estrutura mineral, dificilmente o radônio é liberado para a atmosfera (Tanner, 1978). No entanto, se o radônio gerado pelo decaimento radioativo estiver localizado próximo à superfície, ele poderá ser liberado por espaços intersticiais ou por planos de fraturas das rochas. Para a maioria dos solos, apenas 10% a 50% do radônio produzido consegue ser liberado do mineral em que está presente. (Tanner, 1978). Os átomos de radônio que entram nos interstícios são transportados por difusão e advecção, podendo ser liberados na atmosfera.

Nascimento (2008) destaca que a capacidade de adsorção dos argilominerais pode favorecer a retenção de isótopos radioativos. Dessa forma, espera-se uma relação positiva entre radioatividade e teor de finos. A matéria orgânica presente no solo pode atuar de forma semelhante, contribuindo também para o acúmulo destes isótopos. O autor ainda afirma que os latossolos vermelhos por possuírem textura mais fina e maior teor de argilominerais tendem a possuir maiores valores de radioatividade. Neste caso, deve-se ressaltar que a presença de óxidos de ferro, responsáveis pela cor do solo, são considerados como um elemento favorável à retenção deste e de outros elementos.

O radônio liberado de rochas e solos é rapidamente difundido no ambiente, e conseqüentemente, o elemento em questão não representa uma ameaça à saúde pública quando livre na atmosfera. No entanto, recintos fechados e mal ventilados, cavernas, minas e túneis podem apresentar elevados teores de radônio, sendo um risco para a saúde da população (WHO, 2009).

Solos com elevadas concentrações de radônio são responsáveis pela incidência de altos níveis deste elemento em residências na Finlândia. A diferença de pressão é o que causa a migração do radônio de solos para o ambiente e, conseqüentemente, para dentro de residências. Arvela (2002) concluiu que residências que não possuem porão tendem a ter níveis de radônio mais elevados do que casas que possuem esse compartimento. Diferentes estruturas de fundição, bem como as técnicas utilizadas para construção são importantes fatores na concentração de radônio em moradias. A sugestão proposta pelo autor é fazer que a fundação das residências passasse por um processo de vedação para evitar a emissão do radônio dentro das habitações.

### **2.3 Relação Radônio e Saúde**

Elevados teores de radônio são conhecidos na literatura por apresentar uma série de riscos à saúde da população, podendo, muitas vezes, ser o responsável por casos de doenças como câncer. Os danos causados por emissões de radônio foram amplamente estudados e debatidos por BEIR V (1990).

Estudos da United States Environmental Protection Agency, USEPA, (1999) indicam que altos índices de radônio no ambiente são responsáveis por apresentar riscos à saúde da população. O mesmo estudo revela que 89 % das mortes relacionadas ao radônio são devidas inalação do gás; os outros 11 % são resultados da ingestão direta do mesmo em água.

A NRCP (National Council on Radiation Protection and Measurement) realizou um estudo nos Estados Unidos na década de 80 e constatou que apenas 18% da radiação é resultado de ação humana. Os outros 82% da radiação são decorrentes de processos naturais de decaimento radioativo. Além disso, o radônio foi considerado como a principal fonte natural de radiação.

A Agência Internacional de Energia Atômica (2014) estabeleceu que para residências e edifícios públicos em geral, a média anual de radiação máxima permitida é de 300 Bq/m<sup>3</sup>. Para locais de trabalho como minas subterrâneas, a concentração máxima permitida é de 1000 Bq/m<sup>3</sup>.

Estudos sobre a radiação oriunda do radônio e os riscos causados a saúde da população foram devidamente estudados em países como Reino Unido, Finlândia, Alemanha, entre outros (Tabela 2). Além disso, muitos desses países fornecem níveis máximos tolerados para que uma medida preventiva seja tomada (WHO, 2009).

Tabela 2 - Concentração de radônio em residências em diversos países e os níveis para tomada de ações.

<b>País</b>	<b>Concentração média nos lares (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Nível para ação (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Austrália	*	200
Bélgica	*	400
República Tcheca	140	200
Finlândia	123	400
Alemanha	50	250
Irlanda	60	200
Israel	*	200
Lituânia	37	100
Luxemburgo	*	250
Holanda	*	20
Noruega	51-60	200
Polónia	*	400
Rússia	19-250	*
Suécia	108	400
Suíça	70	1000
Reino Unido	20	200
Comunidade Europeia	*	400
EUA	46	150
Canadá	*	200

(Fonte: WHO, 2009).

Corrêa (2006) realizou um estudo de concentrações de radônio em residências no Município de Curitiba PR. Segundo o autor, 74% das residências

amostradas apresentaram concentrações de até 50 Bq/m<sup>3</sup>, 10% dos resultados ficaram entre 50 e 100 Bq/m<sup>3</sup> e 16% ficaram acima de 100 Bq/m<sup>3</sup>.

No Estado do Rio Grande do Sul, foi realizado um levantamento de dados de radiação pela CPRM e pelo DNPM. O objetivo desse estudo foi adquirir dados de gamaespectrômetro em diversas áreas do Rio Grande do Sul, incluindo a Região Metropolitana de Porto Alegre. Além disso, Mujalli (2015) estabelece uma forte relação entre resultados de gamaespectrômetro e a concentração de radônio nos solos do Distrito de Piquiri, Município de Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul.

Fianco *et al.* (2012) realizaram um estudo pioneiro de concentrações de radônio na região de Porto Alegre, RS, utilizando principalmente dados de concentrações em águas subterrâneas. Segundo os autores, as concentrações de radônio encontradas na região refletem a variabilidade litológica. Cerca de 50% dos poços amostrados no estudo apontaram concentrações do elemento maiores que 100 Bq/L, ou seja, valores maiores do que o permitido pela Organização Mundial da Saúde. O estudo destaca, ainda, que porosidade e permeabilidade dos solos influenciam diretamente na distribuição de radônio.

## 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

### 3.1 Localização e Dados do Município

Porto Alegre é a capital do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil e possui uma área de aproximadamente 480 Km<sup>2</sup> (Figura 2). A cidade está interligada às rodovias federais BR-290 e BR-116. A população do Município é de 1.409.939 habitantes, sendo que a zona metropolitana de Porto Alegre chega a 4.500.000 habitantes (CENSO, 2010).

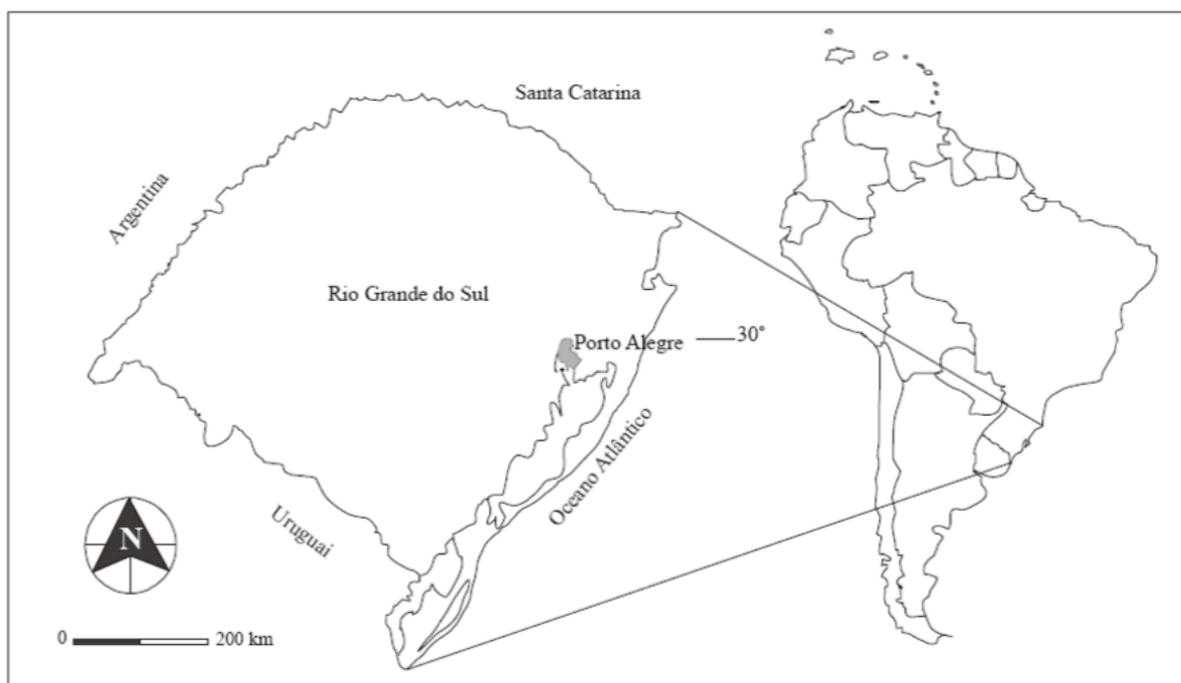


Figura 2 - Localização do Município de Porto Alegre (modificado de Fianco *et al.*, 2012)

### **3.2 Geologia da Região**

Porto Alegre está situada na região onde se localiza o denominado Batólito de Pelotas, que consiste em múltiplas injeções magmáticas (Fragoso César *et al.*, 1986). As unidades mais antigas são o Granito Viamão e Granito Independência, os quais são cortados por unidades mais tardias, representadas pelo Granito Canta Galo, Granito Santana e Granito Ponta Grossa (Figura 3) (Philipp *et al.*, 2002).

O Granito Viamão (GV) estende-se por grande parte das folhas Porto Alegre e Passo do Vigário e constitui a mais extensa unidade plutônica aflorante na região de Porto Alegre (Hasenack *et al.*, 2008). O Granito Viamão está recoberto, ao norte, pelos sedimentos da bacia do Rio Gravataí e, ao sul, pelos sedimentos da planície costeira. Os principais afloramentos desta unidade são pequenos campos de matacões, geralmente arredondados com diâmetro variando de 1m a 6m. A unidade tem elevado grau de alteração e coloração cinza médio com manchas avermelhadas (fenocristais). Além disso, apresenta uma cobertura de até 3m de solo, de coloração alaranjada.

O Granito Viamão possui estrutura foliada de fluxo magmático definida pela orientação dos fenocristais, biotita e enclaves máficos. A principal textura é porfírica, marcada por megafenocristais de K-feldspato com 1cm a 5cm os quais estão imersos em uma matriz equigranular grossa a média (de 4mm a 8mm) de composição granodiorítica (Figura 4) (Hasenack *et al.*, 2008).

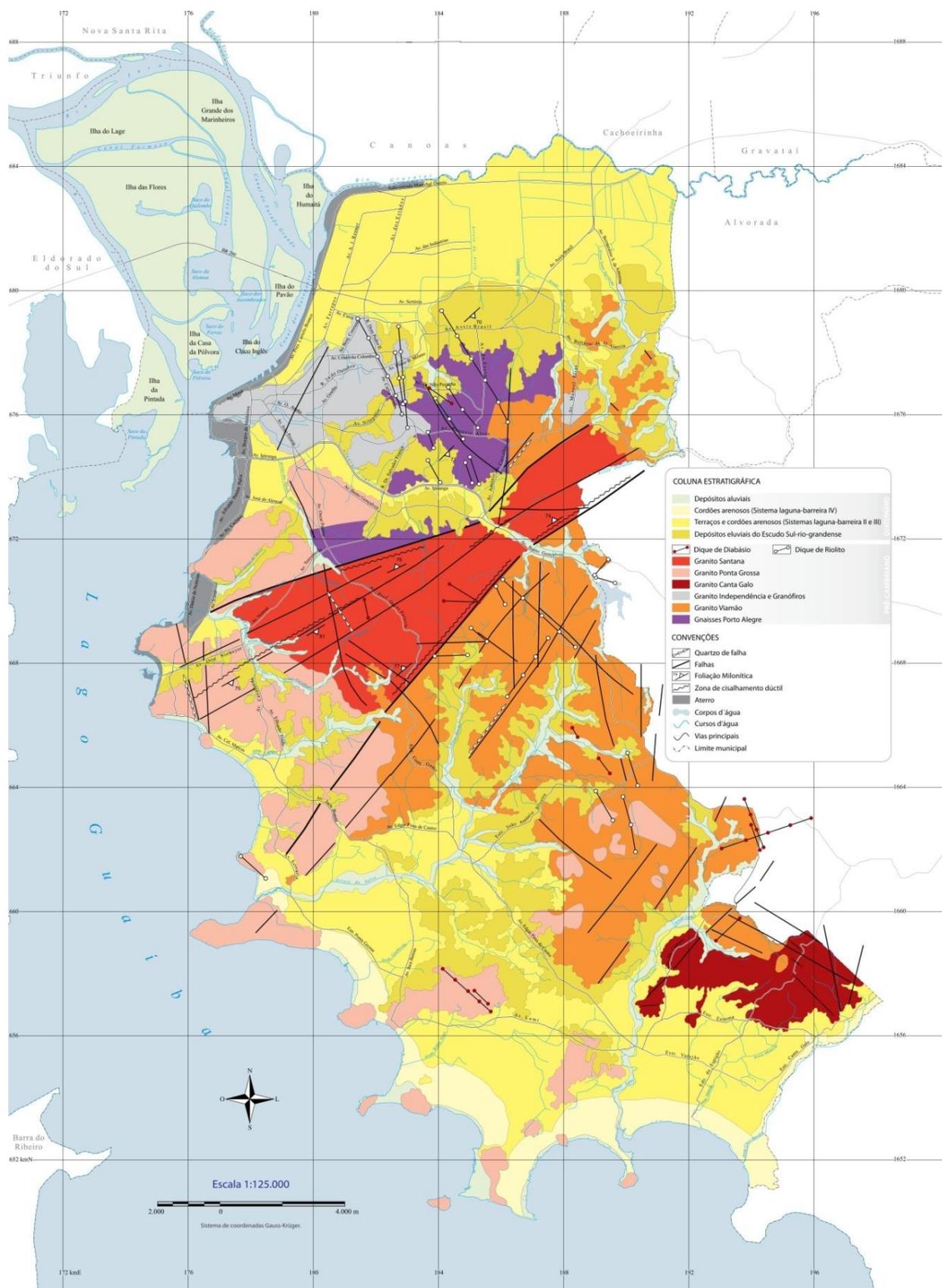


Figura 3 - Mapa geológico da região de Porto Alegre, RS. (Fonte: Hasenack *et al.*, 2008)

O GV é classificado como monzogranito, com alguns termos granodioríticos. A mineralogia essencial da rocha é composta por K-feldspato, plagioclásio, quartzo e biotita. Os minerais acessórios presentes são zircão, apatita, alanita, titanita e opacos. O K-feldspato tem forma tabular alongada, subédrico, com limites retilíneos a lobados. A biotita ocorre de maneira geral intersticial e como agregados lenticulares associados com alanita e minerais opacos. O quartzo apresenta-se estirado ou em forma amebóide. O plagioclásio é euédrico a subédrico, de coloração branca, estando restrito à matriz da rocha. Além disso, ocorrem dois tipos principais de enclaves no Granito Viamão: enclaves máficos (microdioríticos a microgranodioríticos) e xenólitos pertencentes ao Gnaiss Porto Alegre (Hasenack *et al.*, 2008). Ocorrem zonas de cisalhamento no GV, principalmente próximas ao contato com o Granito Santana, sendo caracterizadas por pequenas faixas de protomilonitos, com espessuras variando de 30cm até 5m.



Figura 4 - Textura Porfírica do Granito Viamão (Fonte: Hasenack *et al.*, 2008).

Por ser o maior corpo intrusivo na região e por possuir características geoquímicas favoráveis para conter radônio, essa litologia foi selecionada para realização deste projeto.

### **3.3 Solos da Região**

Na região do Município de Porto Alegre ocorrem seis classes taxonômicas propostas por Hasenack *et al.* (2008) (Figura 5): Associações de Argissolos, associações de cambissolos, associações de planossolos, associações de Gleissolos, Associações de neossolos e os denominados TT (solos tipos de Terreno, os quais são fortemente alterados pela ação humana). Na região do Granito Viamão são encontradas associações de Argissolos, Cambiossolos e Planossolos.

**Argissolos:** Ocorrem em topos e encostas com relevo ondulado. Possuem coloração avermelhada a vermelho–amarelado e podem estar associados à cambissolos háplicos, sendo esses localizados nas áreas de relevo fortemente ondulado. Os argissolos são profundos e possuem horizonte B com textura mais argilosa em relação ao horizonte A, o qual geralmente aparece bastante lixiviado. Nos solos vermelhos a cor é indicativa de solo bem drenado. Nos solos vermelho-amarelos a cor amarelada é indício de um solo moderadamente drenado, com remoção mais lenta, o que possibilita encharcamento mais prolongado após as chuvas. Quanto à fertilidade química, estes solos são classificados como distróficos. (Hasenack *et al.* , 2008).

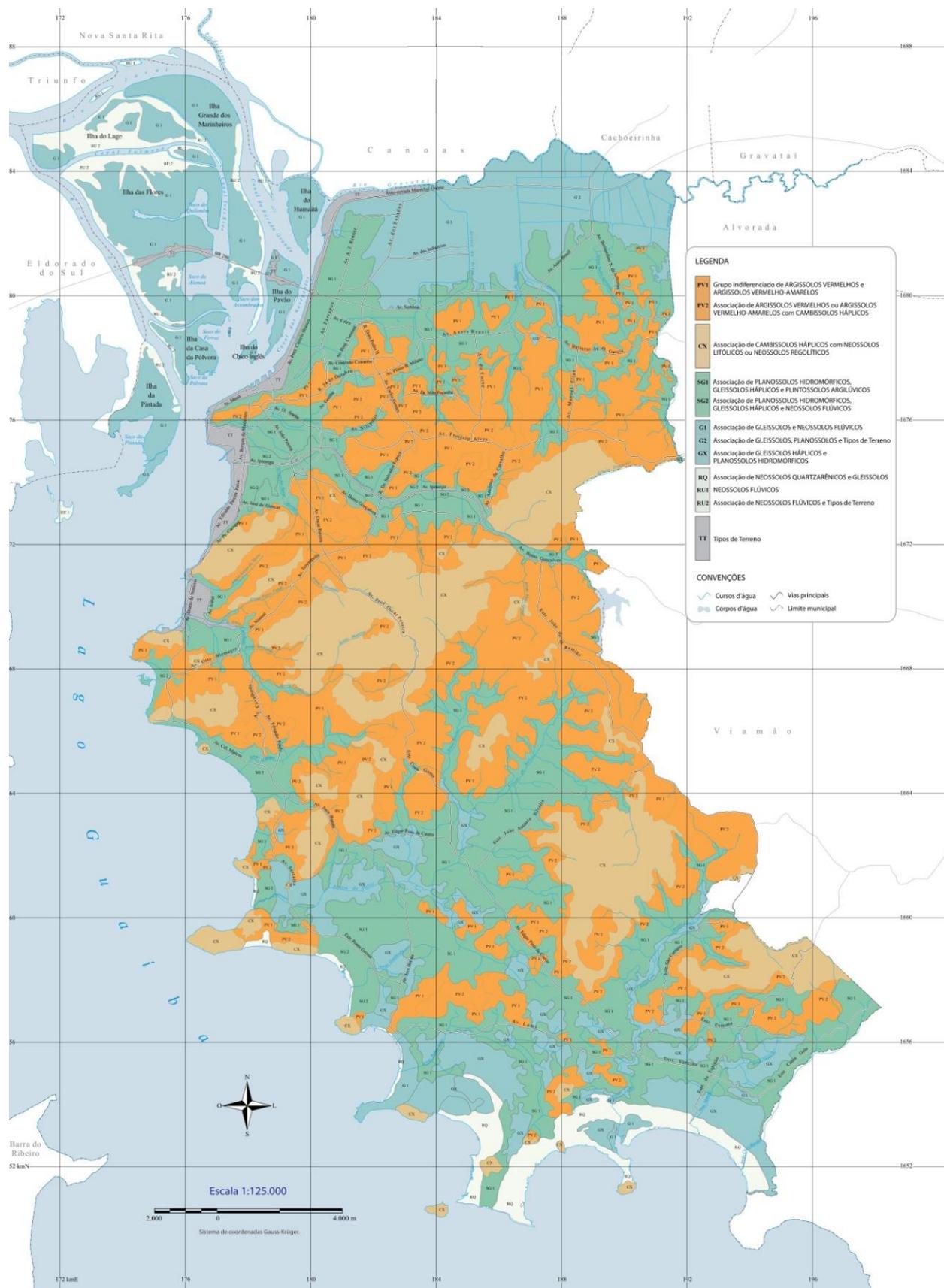


Figura 5 - Mapa de solos da região do Município de Porto Alegre (Fonte: Hasenack et al., 2008)

**Cambissolos Háplicos com Neossolos:** Ocorrem nos topos e encostas dos morros, em relevo fortemente ondulado a montanhoso. Apresentam diferentes profundidades e colorações acinzentadas no horizonte A, avermelhadas ou amareladas no horizonte B e diferentes colorações no horizonte C. A coloração do horizonte B indica uma condição do solo bem a moderadamente drenado. São solos distróficos e podem estar associados à neossolos litólicos ou regolíticos. Os neossolos litólicos são rasos e a o contato com a rocha situa-se na faixa de 50 cm ou menos da superfície. Já os neossolos regolíticos são um pouco mais profundos e a rocha situa-se em profundidade maior que 50 cm em relação à superfície (Hasenack *et al.* ,2008).

**Planossolos e Gleissolos:** Os planossolos são solos mal drenados e geralmente são encontrados nas áreas de várzea, com relevo plano e moderadamente ondulado. Apresentam uma mudança abrupta de horizonte arenoso para bem argiloso, o qual é responsável pela retenção de água do solo. Os gleissolos são solos profundos, mal drenados e de coloração acinzentada ou preta. As feições predominantes indicam ambiente com pouco oxigênio e com acumulação de matéria orgânica (Hasenack *et al.* ,2008).

## 4. METODOLOGIA ANALÍTICA

### 4.1. *Gamaespectrometria*

A radiação gama pertence à classe das radiações eletromagnéticas. Esse tipo de radiação consiste em pacotes de energia transmitidos em forma de ondas. Radiações eletromagnéticas podem se propagar através do espaço sem a necessidade de um meio material. Os raios gama são emitidos por meio de núcleos radioativos com energias bem definidas, ou seja, cada elemento tem a sua energia definida, e correspondem a diferenças entre os níveis de energia de transição em um núcleo. Essa transição pode ocorrer tanto entre dois níveis excitados, bem como entre um nível excitado e o nível fundamental. Sendo assim, pode ocorrer a emissão de um ou mais raios gama em cada desintegração. A energia dos raios gama emitidos por diferentes núclídeos está na faixa de 0,03 até 3 MeV (Montanheiro, 1977).

Espectrômetros de raios gama geralmente são formados por um cristal de iodeto de sódio ativados por tálio NaI(Tl) e dispositivos eletrônicos que separam o feixe de radiação incidente em diferentes componentes energéticos. O ânodo de uma válvula fotomultiplicadora produz pulsos de pequena amplitude os quais possuem alturas variáveis, dependendo da energia de radiação. Esses pulsos são diferenciados de acordo com suas alturas, geralmente por um analisador multicanal de 1024 ou 2048 canais. A janela espectral para medidas gamaespectrométricas possui picos de energia bem definidos em 2,615 MeV para o  $^{208}\text{Ti}$  (decaimento do  $^{232}\text{Tório}$  para  $^{208}\text{Tálio}$ ), 1,76 MeV para  $^{214}\text{Bi}$  (decaimento do  $^{238}\text{urânio}$  para  $^{214}\text{Bismuto}$ ) e 1,46 MeV para o  $^{40}\text{K}$  (transição do Potássio para  $^{40}\text{Ar}$ ) (Montanheiro, 1977).

Para realizar medidas de radiação Gama, foi utilizado o equipamento RS-125 Super GAMMA-RAY SPECTROMETER (Figura 6). Esse equipamento é portátil, pesando menos de 2 kg, e pode ser utilizado em dias com condições climáticas não favoráveis, pois o equipamento é a prova d'água. Além disso, o equipamento possui um detector de NaI de 103 cm<sup>3</sup> com capacidade de ler as energias de excitação de K (em %) e U e Th (em ppm). Também é possível obter dados de contagem total (CPS). Possui resposta de energia entre 30 keV - 3000 keV. Foram realizadas medições de 120 segundos em cada ponto coletado. O equipamento possui uma memória de 4 Mb e pode ser conectado a um GPS via bluetooth, o que facilita a aquisição de dados.



Figura 6 - Equipamento RS-125 Super GAMMA-RAY SPECTROMETER.

## 4.2 Detectores de Radiação no Ar

Existem algumas técnicas para medições de radônio no ar. Técnicas ativas baseiam-se na coleta de uma amostra de ar e numa posterior contagem de radiação alfa do radônio e seus descendentes. Os descendentes do radônio podem ser medidos pela análise das partículas coletadas em filtros de ar ou com monitores contínuos de produtos de decaimento (Pereira *et al.*, 1983).

Medidas de concentração de radônio são realizadas utilizando detectores tipo traços (*track etch*), que consistem em uma câmara circular, contendo fragmentos de plástico (Figura 7). À medida que o gás penetra na câmara, o decaimento do radônio e de seus descendentes é visto em forma de traços sub-microscópicos. Esses traços são resultados da interação de partículas alfa com o material do detector. Esses traços são realçados, por meio de uma solução de hidróxido de potássio, assim, os traços ficam visíveis em microscópio. Uma vez que os traços estão visíveis, é feita uma contagem dos mesmos, a qual deve ser feita em laboratório. Para adquirir dados precisos, os detectores exigem tempos de exposição que variam de algumas semanas até um ano (Pereira, 1983).



Figura 7 - Detectores de radiação tipo CR39 instalados no campo. (Foto de Santos, 2008)

Os detectores de radônio no ar utilizados para realização deste projeto foram do tipo SSNTD (Detectores de Traços Nucleares), conhecidos como CR39 (Columbia Resin 1939). Esses detectores são incolores, possuem densidade de 1,30 g/cm<sup>3</sup> e espessura de 1,0mm. Quimicamente, o composto é chamado de Carbonato Diglicol Alílico (PADC), também conhecido como *Tastrak*, CR-39, tendo como fórmula química C<sub>12</sub> H<sub>18</sub> O<sub>7</sub> (Pereira, 1983).

Os locais para realizar a amostragem foram selecionados devendo ser recintos fechados, como em residências e laboratórios com ventilação restrita. Isso se deve ao fato de o radônio ser um gás e possuir tendência a ficar retido no ambiente se este não for arejado. É importante salientar que o tempo de exposição média do detector deve ser de 30 a 90 dias.

#### **4.2.1 Cuidados na Montagem e Instalação dos Detectores CR-39**

Segundo Santos (2008), Alguns cuidados devem ser tomados na instalação dos detectores para que os dados sejam significativos e confiáveis.

- No momento de estabelecer os locais de amostragem, deve-se tomar cuidado para o detector não ficar exposto. Também não se deve colocá-lo próximo a rede elétrica ou fontes de calor.

- Após o tempo de exposição, os detectores devem ser embalados com cuidado, sem a presença de poeira, pó de rocha, entre outros.

- O detector Cr-39 deve ser colocado no ponto de amostragem dentro do compartimento protetor. O detector somente sairá deste compartimento quando em laboratório. Também é recomendável abrir o compartimento apenas momentos antes de realizar o ataque químico, pois o mesmo pode receber doses de radiação que não interessam no trabalho. Após o compartimento de segurança ser aberto, o detector poderá ser manuseado somente com uso de luvas.

#### 4.2.2 Solução de KOH e ataque químico

Para realizar o ataque químico nos detectores, foi utilizada uma solução de hidróxido de potássio (KOH), com concentração de 30%. Adotou-se o procedimento proposto por Mishra (2005) e o ataque foi realizado a 80°C, durante aproximadamente 5 horas. Para isto, foi utilizado um equipamento de banho térmico da marca Quimis, modelo Q-251 (Figura 8).



Figura 8 - Equipamento de banho térmico da marca Quimis, modelo Q-251, utilizado para o banho térmico.

A visualização do traço formado após o ataque químico só é possível por meio de um microscópio óptico e o formato do mesmo é uma função direta do ângulo de incidência da partícula no detector e do ângulo de observação. O traço, quando observado em microscópio óptico, assemelha-se a uma elipse ou a um círculo, e se for observado transversalmente à superfície do detector, o traço formado assemelha-se a um cone (Mishra *et al.*, 2005).

### 4.2.3 Contagem dos Traços

Depois de realizado o ataque químico, foi feita a contagem de pelo menos 2000 traços por detector com uso de um microscópio da marca da Olympus, modelo BX 40, com ocular de 12,5x, objetiva de 10x (aumento total de 125 x) e grade com área A de 0,02 cm<sup>2</sup> (Figura 9).

A densidade de traços foi calculada utilizando a seguinte fórmula Mishra *et al.* (2005):

$$\bar{X} = \frac{\sum N}{\sum n}$$

Onde,  $\bar{X}$  é a média de traços por campo.  $N$  é número de traços,  $n$  é número de campos.

$$d = \frac{\bar{X}}{A}$$

Onde,  $d$  é a densidade de traços porcm<sup>2</sup>.  $\bar{X}$  é a média de traços por campo, e  $A$  é a área total contada ( $A=0,01 \text{ cm}^2 \cdot n$ ).

A incerteza da densidade de traços,  $I_d$ , foi calculada da seguinte maneira:

$$I_d = \left( \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \cdot d$$

Onde,  $N$  é o número de traços e  $d$  é a densidade de traços.

O valor médio da sensibilidade de resposta,  $S$ , do detector CR-39, obtido em diversos laboratórios, é:

$$S = (2,8 \pm 0,2) \frac{\text{traco.m}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{kBq.h}}$$

Assim, a concentração de radônio no ar é obtida por:

$$C_{Rn} = \frac{d}{S.t}$$

onde,  $d$  é a densidade de traços,  $S$  é a sensibilidade do detector CR-39,  $t$  é o tempo de amostragem, em horas, e  $C_{Rn}$  é a concentração de radônio no ar, em  $Bq/m^3$ .

Para transformar a unidade da concentração de radônio no ar,  $C_{Rn}$ , de  $Bq/m^3$  para  $Bq/kg$ , divide-se  $C_{Rn}$  pela densidade do ar ( $1,23 \text{ kg/m}^3$ ).

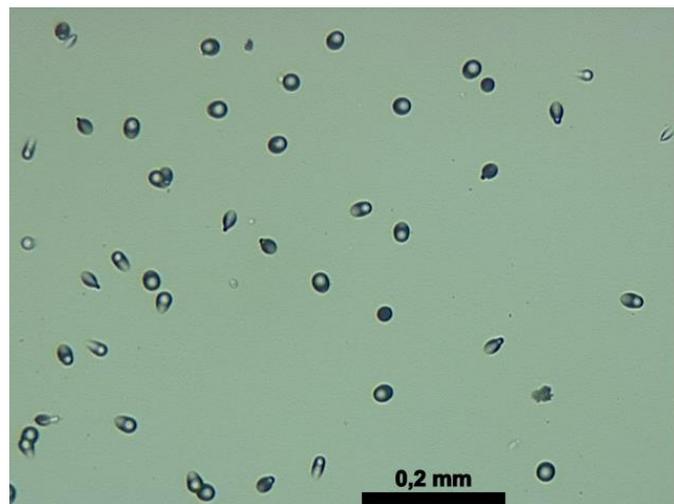


Figura 9 - Detector CR39 após o ataque químico, apresentando um campo de contagem de uma mina de fluorita (Fonte: Santos, 2008)

### **4.3 Análise de radônio no solo com equipamento Sarad RTM 1688-2**

As concentrações de radônio em solos foram medidas *in situ*, utilizando o equipamento Sarad RTM 1688-2 (Figura 10). O equipamento promove uma desgaseificação da amostra em ciclo fechado, o que possibilita a medição da concentração do gás. Além disso, possui uma câmara de ionização e usa espectros alfa para detectar o radônio.

De acordo com o que expressa o manual do equipamento, a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  é medida através da concentração do elemento-filho de mais curta meia vida oriundo do decaimento do próprio radônio, o que ocorrerá no interior da câmara do aparelho. Logo após o decaimento, os átomos de  $^{218}\text{Po}$  são carregados positivamente por um curto período de tempo, pelo fato de que alguns elétrons são carregados positivamente pela emissão de partículas alfa. Esses íons são coletados pelo campo elétrico atuante na superfície de um detector semicondutor. O número de íons de  $^{218}\text{Po}$  coletados é proporcional à concentração de radônio dentro da câmara.

O átomo de  $^{218}\text{Po}$  decai com uma meia vida de 3.05 minutos e cerca de 50% de todo o decaimento será registrado pelo detector. O equilíbrio entre a taxa de decaimento do radônio e o  $^{218}\text{Po}$  detectado é dado após cinco episódios de meia-vida,

ou seja, aproximadamente 15 minutos. Esse tempo corresponde ao tempo mínimo necessário para obter uma resposta significativa de concentração dos isótopos.

#### **4.3.1 Erro Estatístico**

O decaimento radioativo é um processo estatístico e significa que, mesmo que a concentração de radônio seja constante ao longo do tempo, o número de decaimentos (N) contadas em um mesmo período pode variar. N irá variar em torno

do valor médio de todos os intervalos considerados. Um número infinito de intervalos levaria a uma média que indica valor de N mais próximo da realidade. Para um único intervalo, o valor de N será abaixo ou acima desse valor. Este desvio observado é o denominado "Erro estatístico". Além disso, são estabelecidos intervalos de confiança, (Sigma 1, 2 e 3), que se referem, respectivamente, a probabilidades de 68,3%, 95,45% e 99,73%.

#### 4.3.2 Previsão de Erro

O erro previsível (E) para um determinado intervalo de confiança pode ser determinado pelo número de contagem N, seguindo a equação:

$$E[\%] = 100\% * k * \sqrt{N} / N$$

Há dois parâmetros que afetam o número de decaimentos contados. O primeiro, se refere à sensibilidade do aparelho, que é de 3 cts/(min\*kBq/m<sup>3</sup>). O outro parâmetro é o intervalo de tempo da análise.

A relação entre concentração de radônio (CRn), número de contagens N e tempo T é dada pela seguinte equação:

$$CRn = N / (T * S)$$

Onde, S é a sensibilidade do aparelho (3 cts/(min\*kBq/m)).



Figura 10 - Equipamento SARAD RTM 1688-2.

Para realizar medidas de radiação em solos, o equipamento contém uma unidade auxiliar. Essa unidade consiste em uma vara de perfuração de aço com ponta intercambiável e uma sonda capilar (Figura 11). O comprimento da sonda é de aproximadamente 1 metro de comprimento, que será o comprimento do furo no solo. Em seguida, a sonda capilar conectada ao equipamento de análise é colocada no furo e o gás presente no solo é bombeado até a câmara de ionização, onde a concentração total de radônio é determinada (Figura 12).



Figura 11 - Sonda acoplada do aparelho Sarad para análise de radônio em solos.

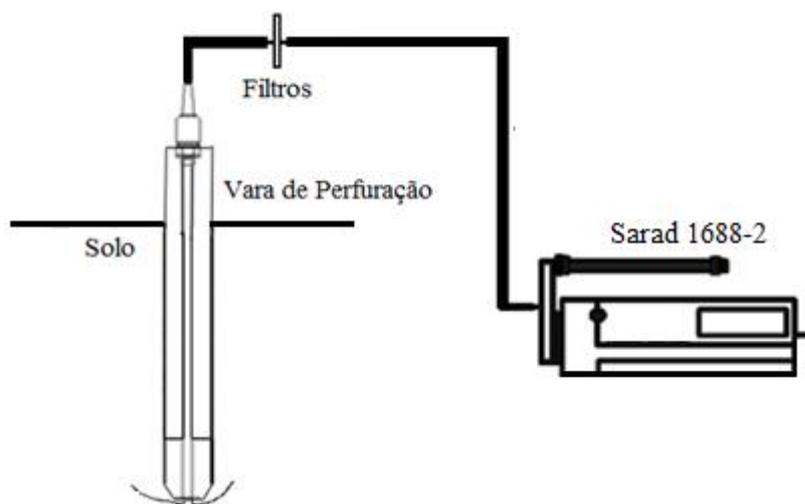


Figura 12 - Representação esquemática do equipamento SARAD para coleta de dados em solos.

### 4.3.2 Cuidados Necessários

Alguns fatores influenciam a liberação do radônio do solo para o ambiente, necessitando de certos cuidados para obter uma maior confiabilidade dos dados adquiridos com o Sarad 1688-2.

- Umidade do solo: quanto maior a umidade, maior a tendência de o radônio ficar retido no solo. Sendo assim, não é aconselhável realizar as análises em dias chuvosos ou com chuvas recentes.
- Temperatura ambiente, quando a temperatura ambiental aumenta, pode ocorrer um fluxo ascendente do gás. É aconselhável realizar a coleta de dados em uma mesma estação do ano, onde as temperaturas sejam similares.
- Além disso, para todas as técnicas utilizadas neste projeto, é importante ressaltar que todos os solos analisados eram solos residuais do Granito Viamão.

## 4.4 Análise Granulométrica do Solo

Análises granulométricas de solo foram realizadas no laboratório de sedimentologia do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica da UFRGS (CECO). Esse processo é importante no projeto, pois a presença do radônio nos poros do solo depende, entre outros fatores, do teor e tipo de argilominerais presentes. Solos finos e argilosos tendem a servir como um tampão, inibindo a percolação do gás (Fianco *et al.*, 2012).

Amostras de solo foram secas em estufa a temperaturas de 50°C por um período de aproximadamente de 72 horas. Para a secagem, as amostras foram colocadas em recipientes com tampa de vidro. Depois de secas, as amostras foram desagregadas e quarteadas manualmente.

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras de solo e no tratamento estatístico desses

dados. Quanto menor a amplitude de classes granulométricas utilizada no trabalho, melhor será a descrição da variabilidade dimensional das partículas.

Para este trabalho, as amostras foram peneiradas na malha 0,062 (areia muito fina) para separação das frações grossa e fina. Depois disso, as amostras foram peneiradas nas malhas 0,125 (areia fina), 0,250 (areia média), 0,50 (areia grossa), 1,00 (areia muito grossa) e 2,00 (grânulo) (Figura 13). Cada fração é pesada em balança de precisão e sua relação com a amostra total é calculada. Para as partículas grossas, é utilizado o princípio de Wentworth e Krumbein.



Figura 13 - Jogo de peneiras utilizado para análise granulométrica.

#### **4.5 Análises por Difractometria de Raios-X**

A Difractometria de Raios-X é umas das principais técnicas para caracterizar micro-estruturas de materiais cristalinos, sendo muito utilizada no estudo de argilominerais. A técnica utiliza o princípio de dispersão ou espalhamento coerente, a qual não ocorre perda de energia pelos elétrons de um átomo. Nesse princípio, o fóton de Raios-X apresenta mudança em sua trajetória, mas mantém a fase e energia do fóton incidente (Kahn, 2001). Essa situação é expressa pela lei de Bragg, onde  $n \lambda = 2d \sin \theta$ , sendo “ $\lambda$ ” o comprimento de onda da radiação incidente, “n” é

um número inteiro que se refere ao número de ordem de difração, “d” à distância interplanar, e “ $\theta$ ” refere-se ao ângulo de incidência dos raios X.

Após realizar a análise em argilominerais, os valores de “n”, “ $\lambda$ ” e “ $\theta$ ” são conhecidos e, por consequência, o único valor desconhecido na equação de Bragg é o valor da distância interplanar do cristal (d), característico para cada grupo de argilomineral. Dessa forma, as medidas das distâncias interplanares juntamente com as intensidades relativas dos picos no difratograma resultante são comparadas com valores de padrões, permitindo a identificação dos argilominerais presentes na amostra (Kahn, 2001).

Os argilominerais são filossilicatos hidratados, ou seja, possuem estrutura cristalina arranjada em camadas e com moléculas de  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}_2\text{O}$  nos espaços interlamelares. Dessa maneira, esses minerais podem sofrer variações na estrutura cristalina, como redução de seus espaços interlamelares se aquecidos a temperaturas que permitam a perda da água. Além disso, os argilominerais apresentam orientação preferencial quando depositados a partir de suspensões, dispondo-se paralelamente aos planos [001], reforçando no difratograma os picos basais. Essas características são utilizadas para identificar grupos de argilominerais e, devido a isso, são preparados diferentes tipos de amostras para análise: amostras simplesmente orientadas, glicoladas e calcinadas. Sendo assim, as diferentes modificações nas estruturas cristalinas dos argilominerais são passíveis de serem detectadas no difratograma (Kahn, 2001).

As amostras de solo foram analisadas no Difrátômetro de Raios X SIEMENS BRUKER AXS, modelo D5000 com goniômetro  $2\theta$  do Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Geociências da UFRGS (Figura 14). As análises foram realizadas com o objetivo de determinar a composição dos argilominerais presentes na amostra.



Figura 14 - Difratorômetro de Raios X SIEMENS BRUKER AXS, modelo D5000 do Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Geociências da UFRGS.

A principal limitação do método de Difractometria de Raios-X para esse estudo é relacionada com a cristalinidade dos argilominerais. A estrutura cristalina do mineral serve como uma rede de difração tridimensional dos Raios-X incidentes sobre ela, portanto, se esses minerais apresentarem muitos defeitos na sua estrutura cristalina, a definição dos resultados pode não ser possível. Além disso, o teor de argilominerais da amostra também pode ser uma limitação, caso esses minerais encontrem-se em concentrações baixas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das diversas técnicas aplicadas neste projeto, bem como as discussões e interpretações realizadas.

### 5.1 Levantamento Gamaespectrométrico

O levantamento gamaespectrométrico, nos canais do Potássio (K), urânio (U), Tório e contagem total (CPS), foi realizado com o equipamento *RS-125 Super gamma-ray spectrometer* em diversos afloramentos do Granito Viamão no Município de Porto Alegre. Os dados obtidos no canal do urânio foram abordados com maior enfoque, pois, como visto anteriormente, o radônio é um produto do decaimento radioativo do urânio. Os dados obtidos no canal do urânio ficaram compreendidos entre 1,4 ppm e 9,7 ppm (Tabela 3), sendo os valores mais elevados encontrados na porção norte do Granito Viamão, próximo ao contato com o Granito Santana (Figura 15). Duarte (2002) indica que os valores médios para rochas graníticas situam-se em torno de 4,2 ppm. No Granito Viamão, os valores máximos registrados podem alcançar o dobro desta concentração.

Tabela 3 - Resultados do levantamento gamaespectrométrico realizado na região.

Ponto	UTM E	UTM N	U (ppm)	Th (ppm)	CPS
1	488325	6673645	9.7	19,1	438
2	488696	6672827	6.2	17,8	312
3	485704	6671240	6.2	10,5	338
4	485704	6671240	4.7	24,1	360
5	485226	6670189	2	13,4	206
6	485658	6669000	2.1	10,7	250
7	483245	6667590	2.7	12,8	280
8	481580	6667621	3.2	17	275
9	483207	6669086	2.5	19,8	250
10	482552	6670252	2.6	40	338
11	482552	6670252	1.4	16,3	260
12	487287	6669743	4.8	12,4	320
13	487544	6670897	4.1	16,1	314
14	487465	6672031	4.1	18,9	310
15	487704	6672119	3.5	16,5	251
16	488903	6670963	3.1	18,8	258
17	488350	6671372	6.6	11,6	250
18	488154	6672230	4.5	17,9	242
19	489399	6672970	7.3	19,2	318
20	490107	6673776	3.2	17,7	240
21	489953	6674352	4.5	11,2	280
22	490046	6675367	6.2	22,5	465
23	490153	6676211	4.6	12,9	356
24	487488	6672708	5.4	12,6	246
25	490084	6667334	5.1	11,7	277
26	489541	6665055	3.6	11,3	233
27	487122	6671318	4.2	14,8	255

Os resultados obtidos com o levantamento gamaespectrométrico foram usados como guia para a determinação dos pontos amostrados para os outros métodos analíticos desenvolvidos neste trabalho, sendo as áreas com maior teor de urânio priorizadas.

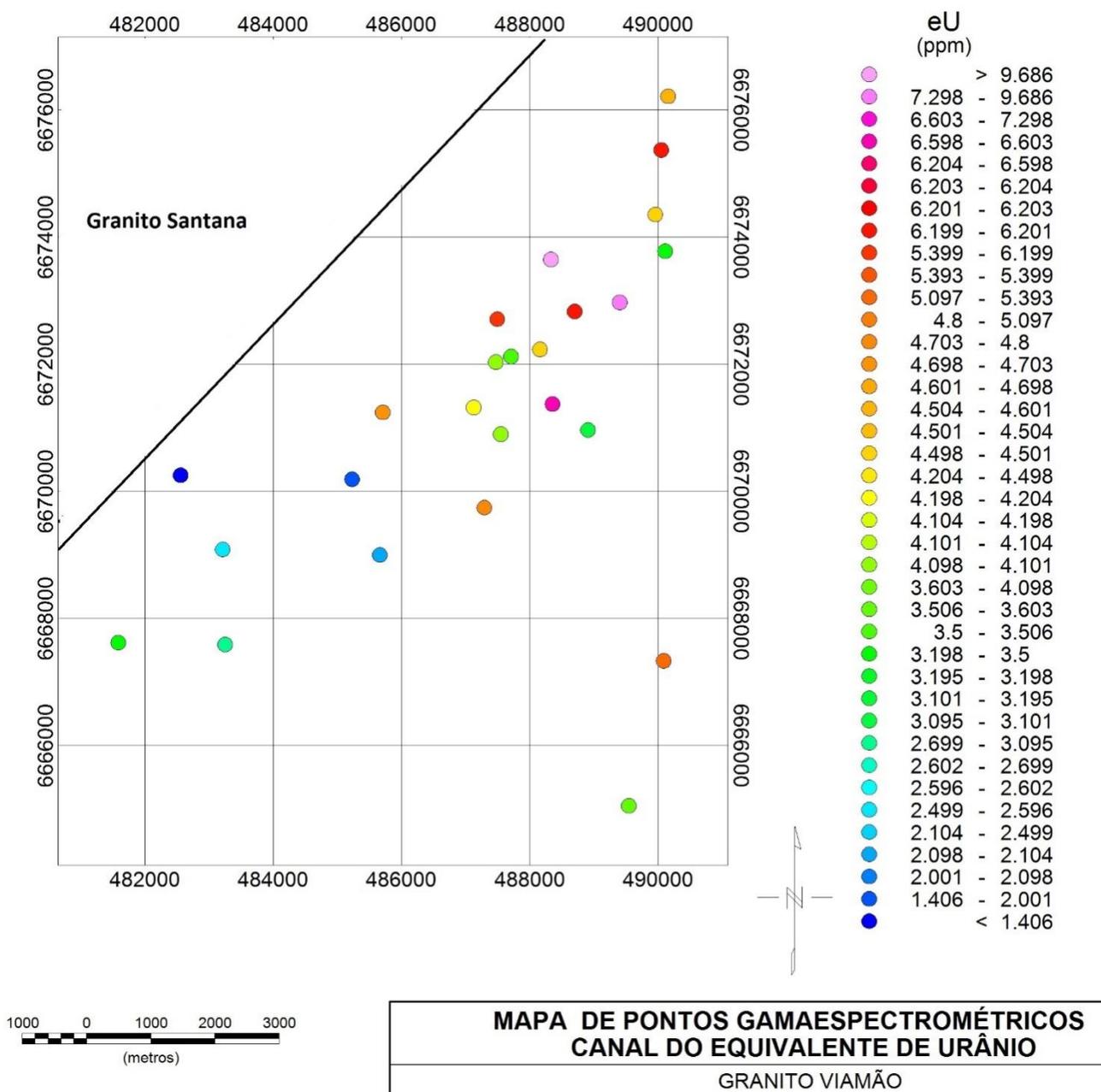


Figura 15 - Relação dos pontos amostrados com gamaespectrômetro e suas respectivas concentrações.

## 5.2 Análises de Radônio em Solos

Foram realizadas análises de radônio em solos residuais do Granito Viamão, utilizando o equipamento Sarad (Tabela 4 e Figuras 16 e 17).

Tabela 4 – Concentração de radônio e localização dos pontos de análise de solos

Ponto	UTM E	UTM N	Rn Bq/m <sup>3</sup>
1	488103	6673004	1788± 10%
2	488311	6673783	3154± 10%
3	489344	6665036	827± 10%
4	482356	6672720	7363 ± 10%
5	490144	6676217	11318 ± 10%
6	488691	6672420	2110 ± 10%
7	488621	6672428	1932 ± 10%
8	484483	6670872	2837 ± 10%
9	483003	6667930	1412 ± 10%
10	482420	6670427	2115 ± 10%
11	487183	6670042	1320 ± 10%
12	486302	6670876	1823 ± 10%
13	485025	6667458	812 ± 10%
14	485186	6669244	1536 ± 10%
15	486015	6671499	2232 ± 10%
16	485230	6672776	4215 ± 10%

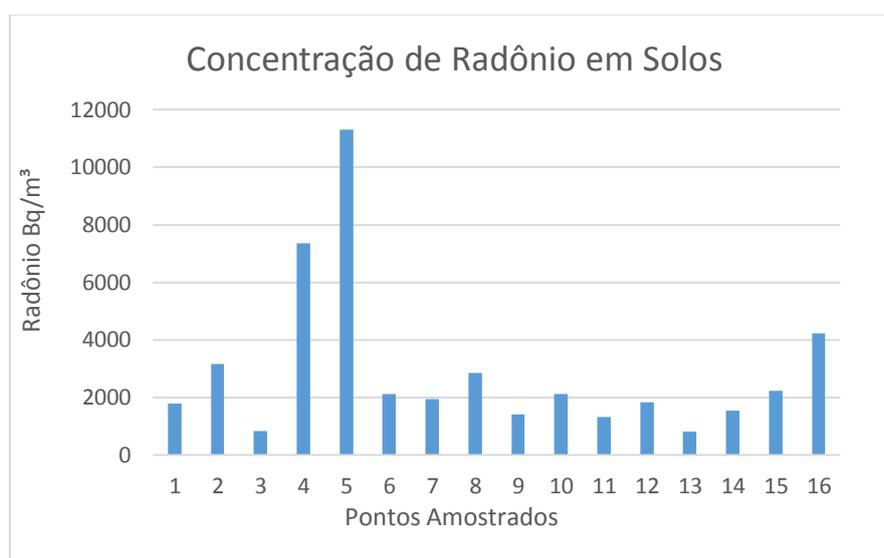


Figura 16 - Concentração de radônio nos 16 pontos amostrados com o equipamento Sarad 1688-2.

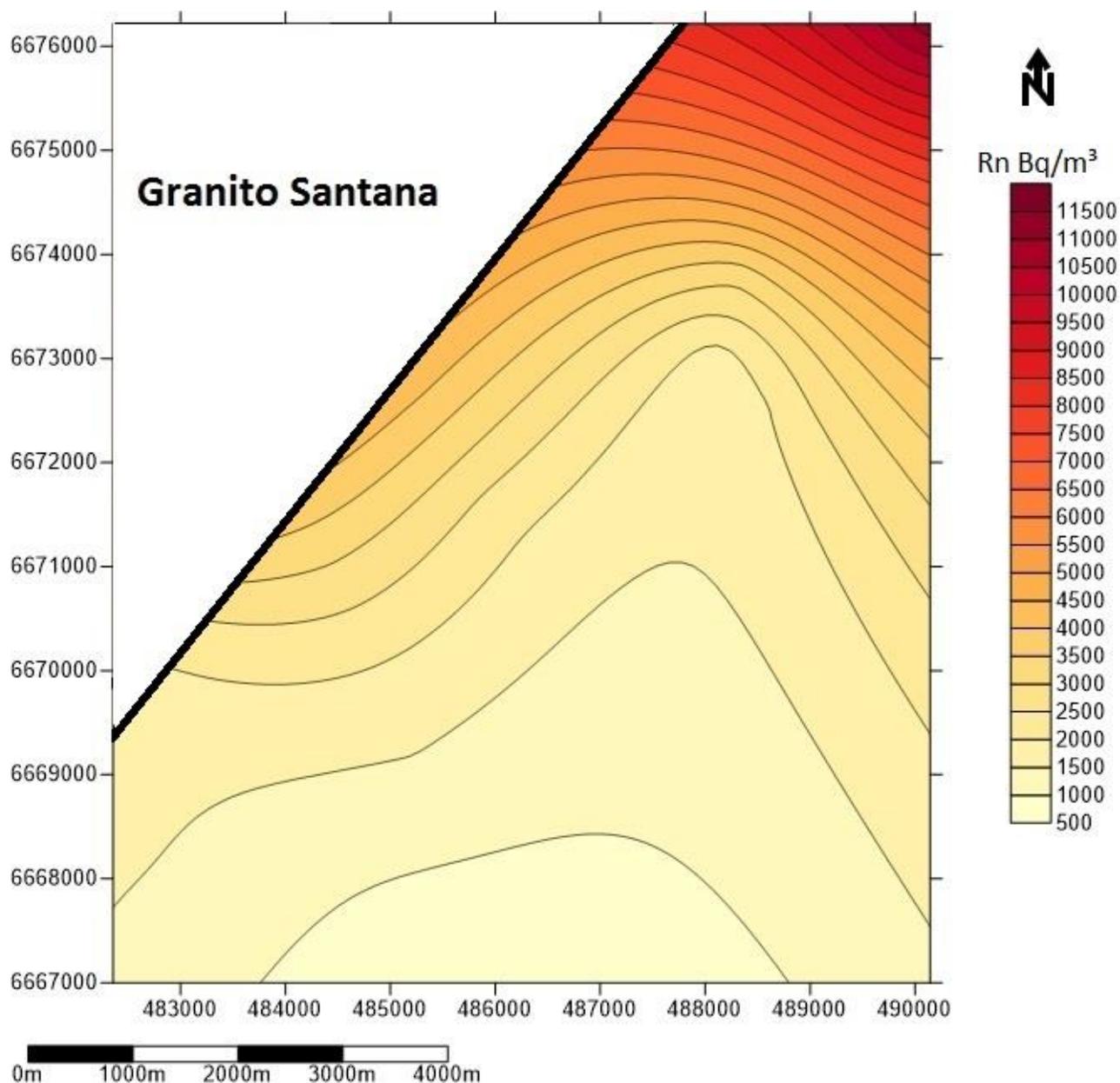


Figura 17- Mapa da concentração de radônio na região do Granito Viamão.

Todos os 16 pontos analisados mostraram significativas concentrações de radônio, compatíveis com aqueles obtidos por Fianco *et al.* (2012), estando compreendidas entre 812 e 11.318, com um erro analítico de  $\pm 10\%$ . Os maiores números localizam-se ao norte da área, próximas ao contato com o Granito Santana.

Segundo Phillip (2008), Ocorre uma zona cisalhamento no GV, também próximas ao contato com o Granito Santana. Essas Zonas de falhas provavelmente são condicionantes importantes no escape do gás para a atmosfera.

### 5.3 Composição da fração de argilominerais nos solos

Cinco amostras típicas de solos residuais do GV foram analisadas por Difractometria de Raios-X (Tabela 5, Figura 18). Os resultados apresentados demonstram que os argilominerais do grupo da caulinita é o argilomineral dominante, com menor incidência de illita, enquanto as esmectitas é relevante somente no ponto 5 (Figura 19).

Tabela 5 – Localização dos pontos de amostragem e composição dos argilominerais em solos residuais do Granito Viamão com as respectivas concentrações de radônio.

Ponto	UTM N	UTM E	Argilominerais presentes	radônio (Bq/m <sup>3</sup> )
1	488103	6673004	Illita + caulinita	1091
2	488311	6673783	Illita + caulinita	3154
3	489344	6665036	Illita + caulinita	827
4	482356	6672720	Illita + caulinita	7363
5	490144	6676217	Illita + caulinita + esmectitas	11318

O registro de esmectitas na composição dos solos no Ponto 5 indica que o mesmo está em estágio inicial de evolução pedogenética, o que foi confirmado no campo através do registro de feldspatos e fragmentos de granito, correspondendo à maior concentração de radônio nas amostras analisadas. É interessante notar que a correlação da presença de esmectitas no solo e a elevada concentração de radônio não é conclusiva, pelo número de amostras analisadas, devendo ser detalhada em trabalhos futuros.

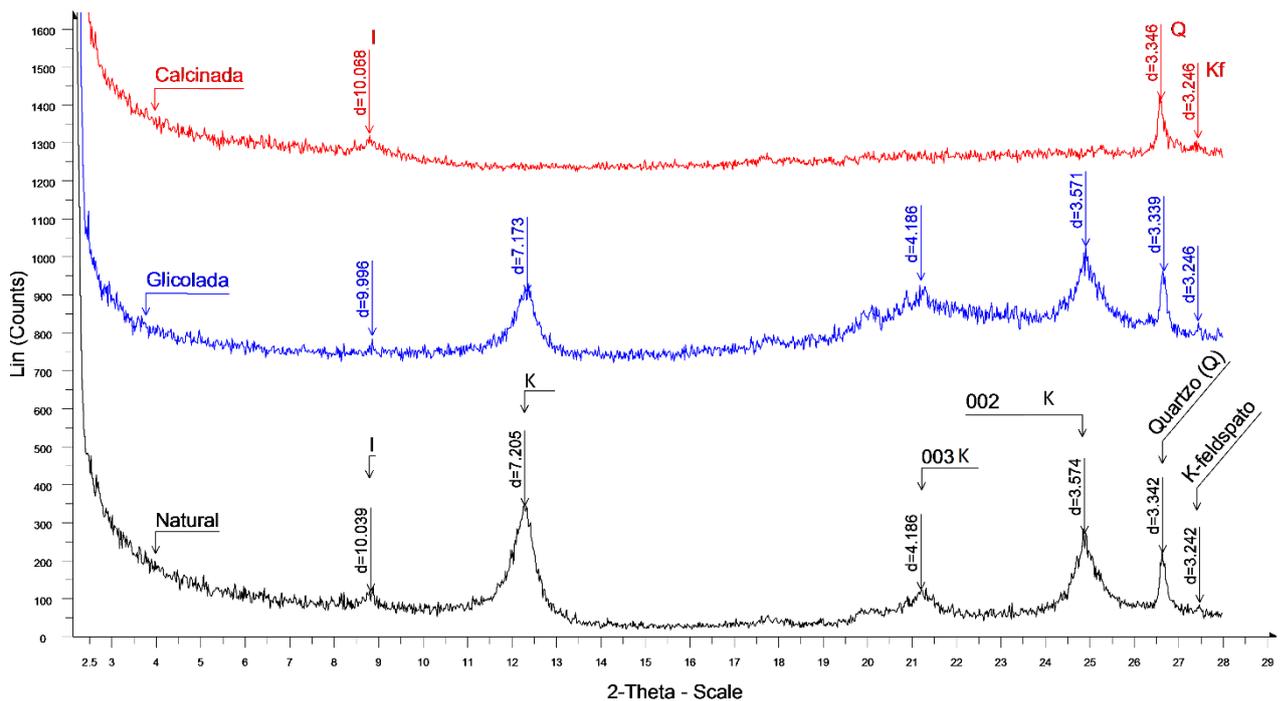


Figura 18 - Difratoograma de Raios-X do Ponto 1. Legenda: ilita (I) e caulinitas (K).

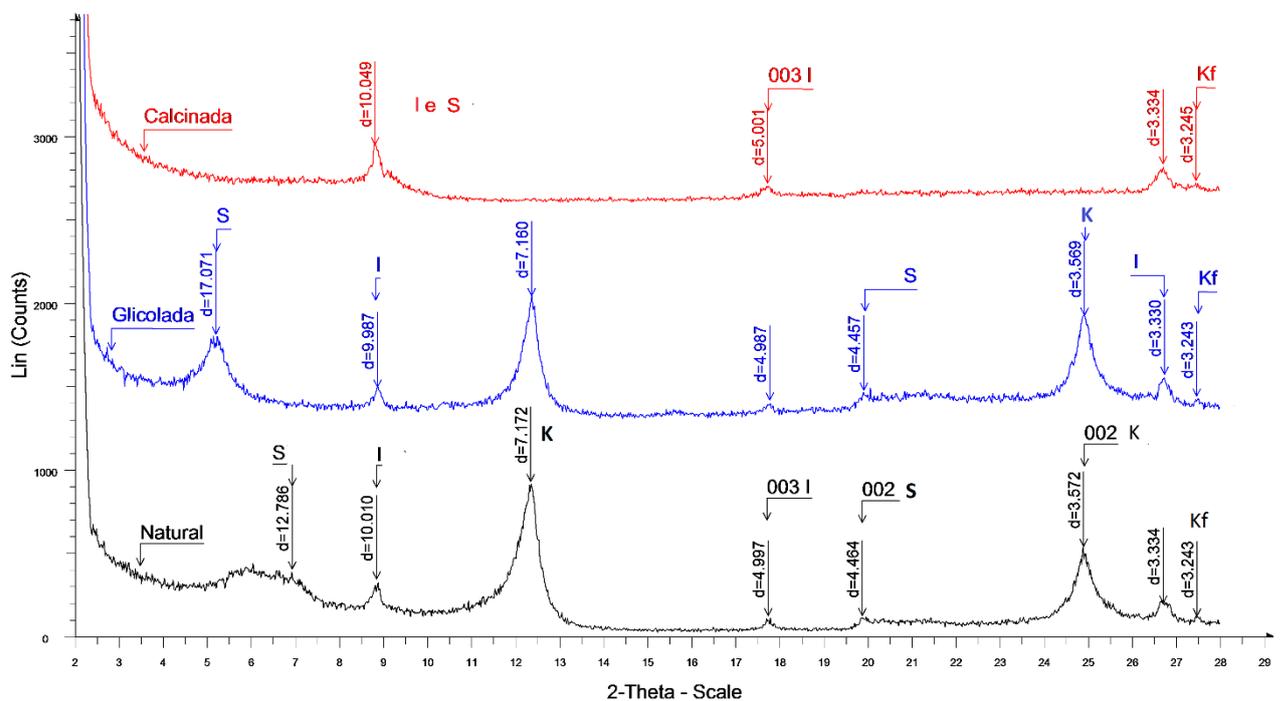


Figura 19 - Difratoograma de Raios-X do Ponto 5. Legenda: Esmeclitas (S), ilita (I) e caulinitas (K).

#### 5.4 Análise Granulométrica dos Solos

Em razão da aparente homogeneidade dos solos foram realizadas análises granulométricas de 5 (cinco) amostras de solo, as mesmas nas quais foi determinada a composição dos argilominerais. A análise granulométrica e a classificação dos solos segundo a classificação textural de Shepard (1954) permitiram classificar os solos da região do Granito Viamão como areias lamosas, com pequena variação textural entre os pontos analisados (Tabela 6). Os dados obtidos confirmam o proposto por Hasenack (2008), que mostra uma predominância de Argilossolos Vermelhos para a região do GV. Além disso, as amostras analisadas apresentam um teor de finos relativamente homogêneo, variando de 27% a 31% (Figura 20).

Tabela 6 – Localização dos pontos de amostragem e resultado da análise granulométrica em solos residuais do Granito Viamão.

Ponto	UTM N	UTM E	Finos (%)	Areia (%)	Cascalhos (%)	Rn Bq/m <sup>3</sup>
1	488103	6673004	27	65.22	4.78	1091
2	488311	6673783	28	70.5	1.5	3154
3	489344	6665036	29.5	65.94	4.56	827
4	482356	6672720	31.3	58	10.7	7363
5	490144	6676217	31.5	60.4	8.1	11318

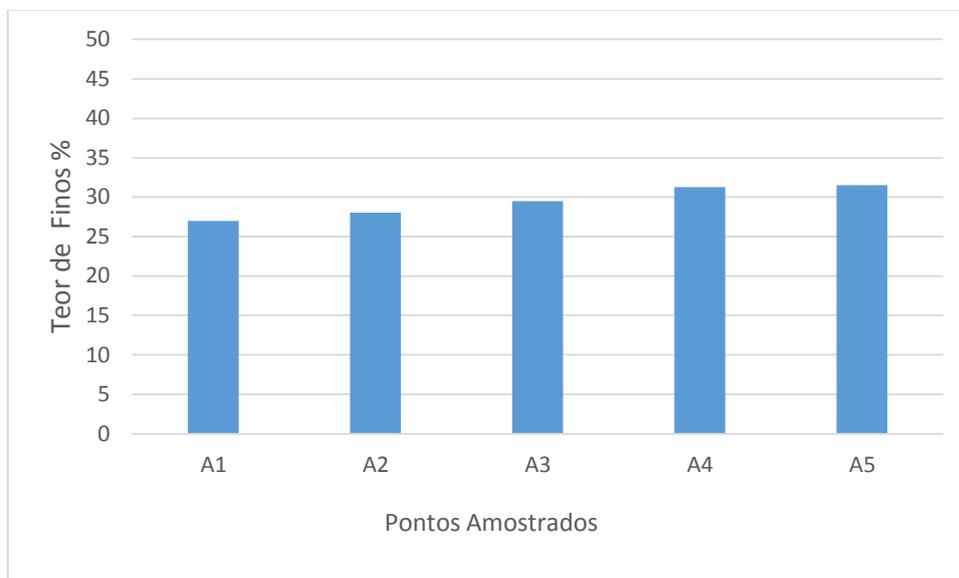


Figura 20 - Teor de finos das amostras analisadas.

Não obstante o pequeno número de amostras nas quais foi analisado o teor de fração fina ( $\leq 2\mu$ ) observa-se que existe uma relação direta entre o teor de finos e a concentração de radônio no solo (Figura 21). Esses dados coincidem com as conclusões obtidas por Fianco *et al.* (2011) na região de Porto Alegre.

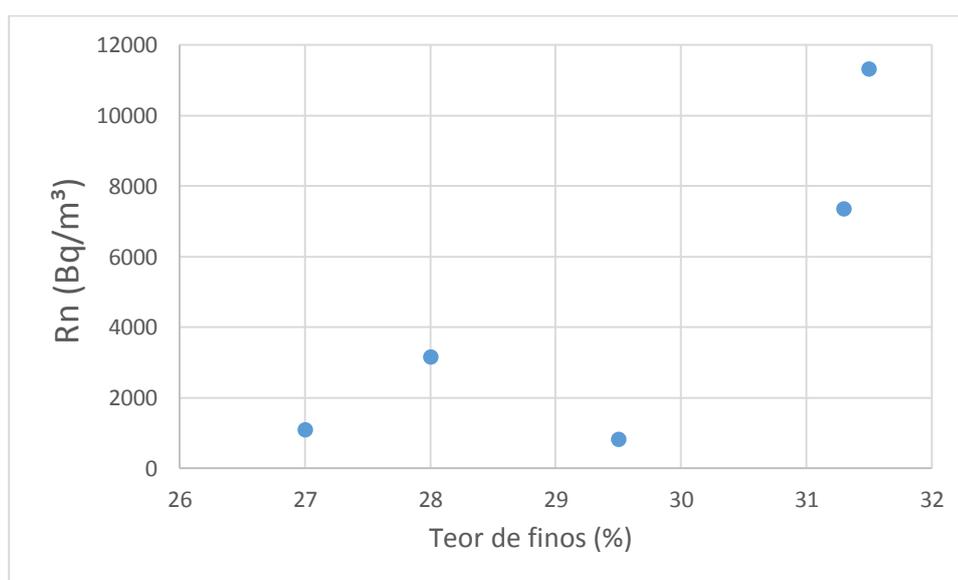


Figura 21 - Concentração de radônio vs. teor de finos nos solos.

## 5.5 Concentração de Radônio no Ar de Ambientes Fechados

Detectores tipo CR-39 foram instalados em diferentes locais de ocorrência do Granito Viamão, incluindo residências e laboratórios no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Tabela 7 e Figuras 22 e 23). Dos sete locais nos quais foram instalados os detectores, seis possuem concentrações inferiores a 100 Bq/m<sup>3</sup>.

Tabela 7 - Localização dos detectores CR-39 instalados e concentração de radônio correspondente.

Detector	UTM E	UTM N	Tipo de Local	Radônio (Bq/m <sup>3</sup> )
C1	488459	6672971	Porão sem ventilação	103
C2	488398	6673120	Gabinete UFRGS	52
C3	489048	6672752	Gabinete UFRGS	69
C4	488369	6673699	Gabinete UFRGS	21
C5	488757	6673806	Residência	45
C6	488135	6676436	Residência	24
C7	487571	6672595	Residência	17

O local C1 corresponde a laboratório do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS. O local, fechado e praticamente sem ventilação, corresponde ao maior valor dentre os obtidos (103 Bq/m<sup>3</sup>). Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica/AIEE (2014), a concentração mínima de radônio no ar para que sejam tomadas medidas de prevenção é de 300 Bq/m<sup>3</sup>. No entanto, é importante salientar que em países como a Lituânia, que possui legislação ambiental própria, esse valor estaria acima do máximo permitido, sendo necessário tomar medidas protetivas.

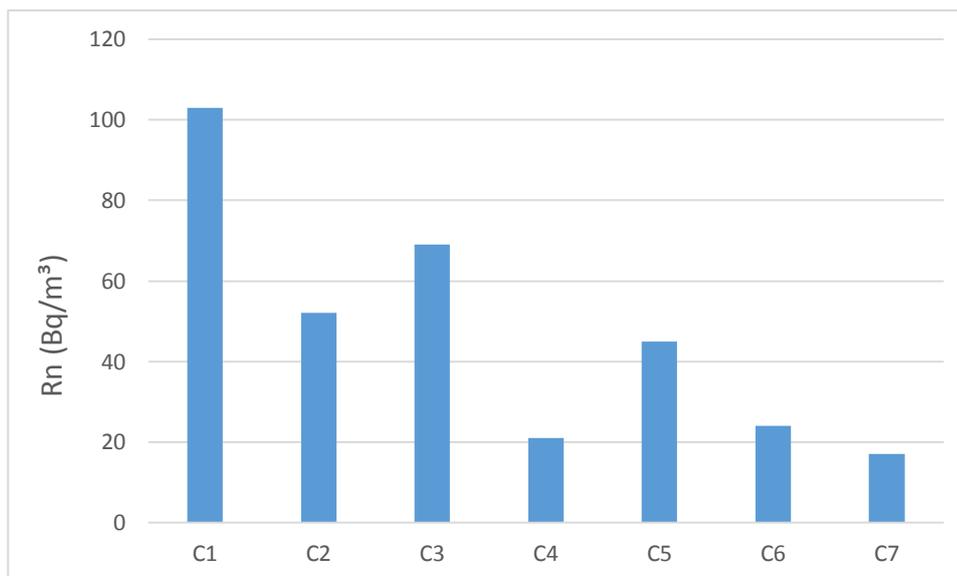


Figura 22 - Concentração de radônio no ar ambiente dos pontos analisados.

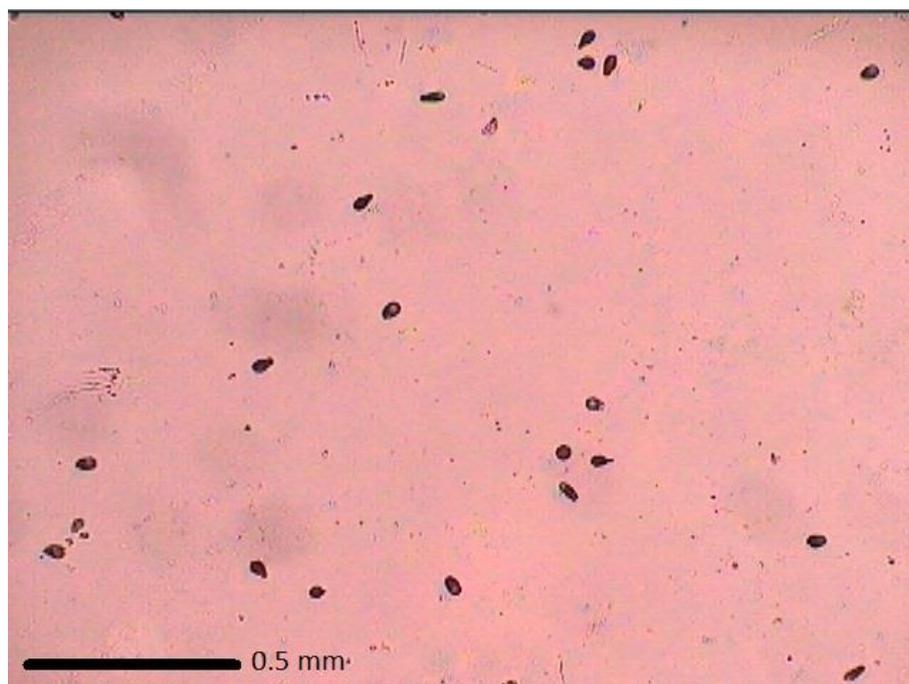


Figura 23 - Traços microscópicos encontrados no detector C1.

Baixas concentrações de radônio encontradas em residências e edifícios na região do estudo deve-se, provavelmente, ao fato de o radônio ficar retido nos solos. Elevados teores de partículas finas, bem como a presença de argilominerais expansivos pode estar influenciando a emissão de radônio para a atmosfera. É importante salientar também que a concentração de radônio em residências, medidas com o equipamento CR-39, pode variar dependendo das condições climáticas, ventilação das habitações e fraturamentos nas construções. Pelo fato de a região apresentar elevadas concentrações de radônio em solos, é aconselhável que um estudo mais detalhado da concentração do elemento no ar seja realizado, para que a saúde da população não fique em risco.

## 6. CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram a eficácia da interação de técnicas envolvendo gamaespectrometria, detectores CR-39 e equipamento SARAD 1688-2 para detecção de radônio no solo e no ar ambiente da região em estudo.
- O presente estudo tratou de analisar a distribuição e transferência de radônio no sistema solo-ar na área de ocorrência do Granito Viamão em Porto Alegre, sendo motivado pelas escassas informações existentes, ao mesmo tempo, oportunizando estabelecer os níveis deste elemento no ar em relação às recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica/AIEE.
- A seleção dos pontos para análise de radônio levou em consideração os resultados realizados com gamaespectrômetro no solo, já que estudos prévios tem demonstrado forte relação entre estes resultados e a concentração de radônio no solo.
- Nos solos residuais oriundos do Granito Viamão foram registradas concentrações relativamente elevadas de radônio, que alcançam valores da ordem de 11.000 Bq/m<sup>3</sup>, em especial ao norte da área estudada, próximo ao contato com o Granito Santana, onde é registrada uma zona de cisalhamento, que parece condicionar o escape do gás radioativo.

- Solos residuais são classificados como areia lamosa, contendo nas amostras analisadas até 31% de partículas finas, o que pode favorecer a retenção de radônio no solo.
- As amostras analisadas mostram dominância de argilominerais do grupo das caulinitas, embora no ponto de maior valor de radônio exista registro de esmectitas no solo. Este dado não pode ser considerado conclusivo pelo número restrito de análises realizadas, mas deve ser considerado para futuros estudos sobre o assunto.
- A análise de radônio no ar de recintos fechados através de detectores CR-39 instalados em 7 (sete) locais alcançou valor máximo da ordem de  $100 \text{ Bq/m}^3$ , o que se situa abaixo do limite protetivo de  $300 \text{ Bq/m}^3$ , estabelecido pela Agência Internacional de Energia Atômica e ainda inferior aos limites de vários outros países do Hemisfério Norte que estabelecem valores inferiores a  $150 \text{ Bq/m}^3$ . O Brasil deveria propor estudos para estruturar uma legislação própria, considerando sua condição climática peculiar.
- O registro de radônio localmente elevado em solos residuais do Granito Viamão, no Município de Porto Alegre, demonstra a recomendação estudos mais detalhados em outras regiões da cidade. Além disso, recomenda-se o monitoramento pelas autoridades competentes em outros tipos de ambientes fechados, como garagens subterrâneas, pavilhões industriais e porões, tendo em vista os efeitos nocivos da inalação de radônio à saúde humana e animal.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arvela, H. "Experiences in radon-safe building in Finland." *Science of the total environment* 272.1 (2001): 169-174.

Appleton, J.D. 2005. Radon in air and water. In: Selinus, O. & Smedley, P. (Eds). *Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health*. Londres, British Geological Survey. NERC, p. 227 – 262.

Beir, V. "Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation." Washington, DC: National Academy of Sciences (1990).

Corrêa, J. N. Avaliação de Concentração de radônio em Ambientes de Convívio Humano na Região Metropolitana de Curitiba. UTFPR, Master Degree Thesis, 2006.

Duarte, C. R. (2002). Radioelementos naturais na área do Projeto Rio Preto (GO).

Fianco, A.C.B., Roisenberg, A. & Bonotto, D.M. 2012. Radon emissions related to the granitic Precambrian shield in southern Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 48 (1), 122 – 131.

Fragoso Cesar, A.R.S., Figueiredo, M.C.H., Soliani Jr., E. & Faccini, U.F., 1986. O Batólito de Pelotas (Proterozóico Superior/Eo-Paleozóico) no Escudo do Rio Grande do Sul. in: Congresso Brasileiro de Geologia, 34. Anais. Goiânia: SBG, 1986. 3, pp. 1322-1343.

Hasenack, H., E. Weber, & S.F Marcuzzo. "Diagnóstico ambiental de Porto Alegre." Edição, Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Porto Alegre (2008).

International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. 2014.

Kahn, H. PMI-2201. Difração de Raios X. Apostila de aula. USP.

Lima, R.M.F, & Luz, J.A.M. "Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes." Rem: Revista Escola de Minas 54.2 (2001): 155-159.

Mishra, R., Orlando, C., Tomasino, L., Tonnarini, S. & Trevisi, R. (2005) A better understanding of the background of CR-39 detectors. Radiation Measurements, vol. 40, pp. 325-328. Elsevier.

Montanheiro, M.N.S., Filho, V.F.N & Pinto, F.A "Introdução à espectrometria gama." Boletim Didático 021 (1977).

Mujalli, G.R. "Espectrometria de raios gama e concentrações de radônio em solos da Região do Maciço Sienítico Piquiri, Municípios de Cachoeira do Sul/Encruzilhada do Sul, RS."(2015).

Nascimento, C.T.C. & Moraes, R.A.V. Reconhecimento de solos por meio de resistividade elétrica e radiação gama. Brazilian Journal of Geology, v. 34, n. 3, p. 383-392, 2008.

National Research Council (US). Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Health effects of exposure to radon. Vol. 6. National Academies Press, 1999.

Pereira, J.F.A., Estrada, J.J.S., Binns, D.A.C. e Urban, M. (1983) Técnica de Medida de radônio no Ar Utilizando um Detector Plástico de Traços. IRD/CNEN. RJ.

Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S. & Lafon, J.M. 2002. O magmatismo granítico neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: Novos dados e Revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(2), 277 – 290.ddd

Philipp, R. P. Geologia de Porto Alegre. Diagnóstico ambiental de Porto Alegre: geologia, solos, drenagem, vegetação/ocupação e paisagem. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008.

Rio Doce, A. P. C. (1997) Determinação da taxa de exalação de Rn-22 em materiais de construção. Dissertação de mestrado apresentado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ-COPPE.

Santos, C. E. L. Determinação dos Processos de Enriquecimento e das Concentrações de radônio em Minas Subterrâneas de Fluorita e Carvão do Estado de Santa Catarina: Critérios para Avaliação dos Riscos Radiológicos. Diss. Dissertação de MSc., UFRGS, Porto Alegre, 2008.

Shepard, F.P. "Nomenclature based on sand-silt-clay ratios." *Journal of Sedimentary Research* 24.3 (1954).

Tanner, A. B. (1978) Radon migration in the ground: A supplementary review, *Natural Radiation Environment III, Symposium Proceeding*, vol. 1, pp.5-56, Houston, Texas.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1999. Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis. Washington, Federal Register 64, pp. 9559-9599.

WHO, World Health Organization. 2009. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Genebra, WHO, 95p.