UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

MONIQUE SOARES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ÁGUAS DE POÇOS, ROCHAS E SOLOS EM CARAMBEÍ-PR

CURITIBA

2021

MONIQUE SOARES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ÁGUAS DE POÇOS, ROCHAS E SOLOS EM CARAMBEÍ-PR

EVALUATION OF RADONIUM CONCENTRATION LEVELS IN WATER FROM WELLS, ROCKS AND SOILS IN CARAMBEÍ-PR

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de "Mestre em Ciência" – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.
Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk.
Coorientadora: Prof. Dra. Janine Nicolosi Corrêa.

CURITIBA

2021

4.0 Internacional

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba

MONIQUE SOARES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ÁGUAS DE POÇOS, ROCHAS E SOLOS EM CARAMBEÍ-PR

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Biomédica.

Data de aprovação: 25 de Agosto de 2021

Prof Sergei Anatolyevich Paschuk, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Hugo Reuters Schelin, Doutorado - Instituto de Pesquisa Pele Pequeno Principe - Ipppp

Prof.a Janine Nicolosi Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Oderson Antonio De Souza Filho, Doutorado - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Cprm

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/08/2021.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e pela sua infinita bondade e misericórdia.

Ao CPGEI, pelo curso ofertado.

Ao professor Sergei Paschuk, pela orientação, incentivo e suporte.

À professora Janine Corrêa, pela coorientação e paciência ao longo de toda a pesquisa.

À professora Alessandra de Barros e Silva Bongiolo, pelo auxílio geológico.

Aos servidores Adriana Fernandes e Alan Assis da Vigilância Sanitária de Carambeí, que nos acompanharam durante toda a pesquisa de campo.

Aos moradores de Carambeí, por nos receberem e contribuírem com essa pesquisa.

Às professoras Flávia Del Claro e Catarina Montenegro, por todo o apoio, encorajamento e amizade desde a graduação.

Aos meus colegas de laboratório pelas contribuições e companheirismo, em especial à Silvia Gallo.

Aos meus amigos que estiveram sempre ao meu lado.

Ao meu filhote Lucky, que fez com que essa jornada fosse menos estressante e mais alegre.

Ao meu irmão Dudo, por todo companheirismo e pelo incentivo aos meus primeiros passos da graduação.

Aos meus sobrinhos, Julia e Jordan que estão sempre em meu coração.

Aos meus pais, Roberto Oliveira e Zilda Oliveira, pela educação, incentivo em todas as etapas da minha vida e por todo amor e carinho que me deram durante toda minha existência, meus eternos agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Quem divide o que tem é quem vive pra sempre”

Emicida

RESUMO

OLIVEIRA, Monique Soares. **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em águas de poços, rochas e solos em Carambeí-PR**. 2021. 81f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A excessiva exposição humana à radiação natural, principalmente ao gás ^{222}Rn, pelos malefícios que esta radiação causa em relação à saúde pública, ressalta a importância de pesquisas sobre o radônio. Apesar do controle de qualidade da água distribuída para a população ser uma questão de saúde pública estabelecida, não há protocolos de medições de radônio. Há uma influência dos solo e rochas na concentração de radônio nas águas de poços, pois, solos ricos em urânio e tório, consequentemente exalam radônio que adentra nas águas adjacentes. Com isso, é importante realizar pesquisas com a finalidade de contribuir com o conhecimento da qualidade da água em relação ao radônio consumida por moradores que utilizam água de poço. A área rural de Carambeí, no estado do Paraná, possui várias chácaras e sítios cujos moradores utilizam a água de poço como fonte de água potável. Assim, considera-se que a avaliação de radônio em águas de poços, rochas e solos na região é pertinente. O objetivo deste trabalho é avaliar as concentrações de radônio em águas de poços, rochas e solos na região de Carambeí, no estado do Paraná e assim contribuir para base de dados para o Programa Nacional de Radônio no Brasil, sobre a coordenação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Os pontos de interesse para coleta de amostras de água e rochas e também medições *in loco* do solo tiveram foco em propriedades que possuem poços. Foram realizadas coletas de amostras de água de poços dos locais e também de rochas encontradas ao redor das residências dos locais previstos para a medição. Também foram feitas medições de radônio dos solos locais. As análises foram feitas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os resultados das concentrações de ^{226}Ra encontrados nas amostras de águas de poços ficaram na faixa de 0,3±0,3Bq/L a 3,8±2,3Bq/L, as quais cerca de 64% dessas amostras estão acima do valor 0,5 Bq/L, o limite para emissão alfa. Nas mesmas amostras, foram encontradas concentrações de ^{222}Rn que variaram de 0,4±0,8Bq/L a 87±13Bq/L sendo que cerca de 81% das amostras apresentam valores também acima de 0,5 Bq/L. No caso das concentrações de radônio suportado, gerado pelo ^{226}Ra, avalia-se que a contribuição para o interior de ambientes que façam uso dessas águas de poço, que podem ser um problema de saúde pública. Os níveis de concentração de ^{222}Rn nas rochas graníticas variaram de 1141±26Bq/m³ a 53,7±1,6Bq/m³. Foram realizados cálculos das concentrações simulando que essas rochas estavam inseridas em um cômodo padrão da UNSCEAR. No caso onde a concentração de rocha granítica ficou acima dos limites estabelecidos, a contribuição para o cômodo padrão não ultrapassa os valores recomendados. Já os resultados de medições dos radionuclídeos ^{222}Rn e ^{220}Rn no solo apresentam concentração na faixa de 18,4±4,1kBq/m³ a 208±21kBq/m³ e 27±8kBq/m³ a 188,4±0,9kBq/m³, para cada isótopo, respectivamente. Os valores encontrados nesta pesquisa servem como base para o Programa Nacional de Radônio e permitem observar haver uma questão de saúde pública, principalmente relacionada à quantidade de rádio, e consequentemente de radônio *indoor*, em residências ou ambientes que façam uso desta água para consumo.

Palavras chaves: Radioatividade Natural; Águas de Poços; Rochas. Solos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Monique Soares. **Evaluation of radon concentration in well water, rocks and soils of Carambeí – PR**. Brazil. 2021. 81f. Dissertation – Graduate Program in Electrical and Computer Engineering, Federal University of Technology of Paraná. Curitiba, 2021.

Human exposure to natural radiation, especially ^{222}Rn gas, due to the harm that this radiation causes in relation to public health, highlights the importance of research on radon. Although the quality control of water distributed to the population is an established public health issue, there are no radon measurement protocols. There is an influence of the type of soil and rocks in the concentration of radon in well water, as soils rich in uranium and thorium, consequently, release radon that difuses to the adjacent water. Therefore, it is important to performe research in order to contraibute to the knowledge of water quality in relation to radon consumed by the population that use well water. The rural area of Carambeí, in the state of Paraná, has several farms whose residents use well water as a source of drinking water. Thus, it is considered that the evaluation of radon in well water, rocks and soils in the region is relevant. The objective of this work is to evaluate the radon concentration in well waters, rocks and soils in the region of Carambeí, in the state of Paraná - Brazil, and thus contribute to a database for the National Radon Program on the coordination of the Geological Survey of Brazil (CPRM). The points of interest for collecting water and rock samples and also local soil measurements focused on properties that have wells. Samples of water were collected from local wells and also from rocks found around the homes in the locations planned for measurement. Local soil radon measurements were also performed. The analyzes were done at the Laboratory of Applied Nuclear Physics (LFNA) of the Federal University of Technology – Paraná - Brazil. The results of ^{226}Ra concentrations found in well water samples were in the range of 0.3±0.3 Bq/L to 3.8±2.3 Bq/L, of which about 64% of these samples are above the value 0.5 Bq/L, which is the limit for alpha emission. In the same samples, ^{222}Rn concentrations ranging from 0.4±0.8 Bq/L to 87±13 Bq/L were found, and about 81% of the samples also presented values above 0.5 Bq/L. In the case of supported radon concentrations, generated by ^{226}Ra, it is estimated that the contribution to the interior of environments that make use of these well waters can be a public health problem. The levels of ^{222}Rn concentration in granitic rocks ranged from 1141±26 Bq/m³ to 53.7±1.6 Bq/m³. Concentration calculations were performed simulating that these rocks are based in a UNSCEAR standard room. In the case where the granitic rock concentration was above the established limits, the contribution to the standard room does not exceed the recommended values. The results of measurements of radionuclides ^{222}Rn and ^{220}Rn in the soil show concentrations in the range of 18.4±4.1 kBq/m³ to 208±21 kBq/m³ and 27±8 kBq/m³ to 188.4±0.9 kBq/m³, for each isotope, respectively. The values found in this research serve as a basis for the National Radon Program and allow us to observe that there is a public health issue, mainly related to the amount of radium, and consequently indoor radon, in homes or environments that use this water for consumption.

Key words: Radon; Natural Radioactivity; Well Water; Rocks; Soils.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Série radioativa ^{235}U 25
Figura 2 - Série radioativa do ^{232}Th 26
Figura 3 - Série radioativa do ^{238}U 26
Figura 4 - Percentual de dose recebida pelos seres humanos decorrente de radiação natural e artificial conhecida 29
Figura 5 - Modelo dosimétrico HRTM 35
Figura 6 - Mapa das contrações de radônio nas residências dos EUA 36
Figura 7 - Lugares em que o ^{222}Rn pode adentrar em uma residência. 39
Figura 8 - Processo de emanação e exalação 41
Figura 9 - Ilustração de área rural do município de Carambeí 44
Figura 10 - Mapa dos pontos escolhidos na região de Carambeí 46
Figura 11 - Arranjo AquaKIT 48
Figura 12 - Arranjo utilizado para medidas de solo 48
Figura 13 - Arranjo utilizado para medidas de rochas 49
Figura 14 - Águas após a coleta 50
Figura 15 - Arranjo utilizado para medição de radônio em água 51
Figura 16 - Amostras de rochas fechadas em frascos de vidro 53
Figura 17 - Arranjo utilizado para medidas de radônio em rochas 54
Figura 18 - Desenho esquemático do sistema aberto utilizado para ventilação 54
Figura 19 - Arranjo para medida de solo 56
Figura 20 - Concentração de ^{226}Ra e ^{222}Rn do poço 1 59
Figura 21 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R1 60
Figura 22 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R2 61
Figura 23 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R7 61
Figura 24 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R9 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energia da partícula α em relação a distância percorrida 29
Tabela 2 - Fator de qualidade efetivo 31
Tabela 3 - Decaimento do ^{222}Rn 32
Tabela 4 - Média mundial de concentrações de radônio em ambientes internos 40
Tabela 5 - Intervalo entre as medidas 50
Tabela 6- Resulltado das concentrações de ^{226}Ra e de ^{222}Rn nos poços 59
Tabela 7 - Resultados de concentração de ^{222}Rn em rochas graníticas 62
Tabela 8 - Comparação da concentração de ^{222}Rn no cômodo padrão em diferentes situações 63
Tabela 9 - Resultados das medidas das concentrações de ^{222}Rn e ^{220}Rn em solo 63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EPA	*Environmental Protection Agency*
EUA	*United States of America*
HPA	*Health Protection Agency*
HRTM	*Human Respiratory Tract Model*
IAEA	*International Atomic Energy Agency*
IARC	*International Agency for Research on Cancer*
ICRP	*International Commission on Radiological Protection*
LET	*Linear Energy Transfer*
NNDC	*National nuclear Data Center*
NORM	*Naturally Occurring Radioactive Materials*
OMS	Organização Mundial da Saúde
UNSCEAR	*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WHO	*World Health Organization*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **18**
1.1.1 Objetivo Geral 20
1.1.2 Objetivos Específicos 20
1.2 JUSTIFICATIVA **21**
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO **22**
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA **23**
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO **23**
2 REVISÃO DA LITERATURA **24**
2.1 Radioatividade Natural **24**
2.2 Efeitos Biológicos Relativos à Radiação Natural **28**
2.3 DOSE **30**
2.4 Radônio **31**
2.5 Efeitos Biológicos Relativos Ao Radônio **34**
2.6 Radônio em Águas Subterrâneas **36**
2.7 Radônio em Ambientes Internos **37**
2.8 Radônio Em Solos E Rochas **40**
2.8.1 Caracteristicas dos Solos do Município De Carambeí 43
3 MATERIAIS E MÉTODOS **45**
3.1 Medidas de Radônio **47**
3.1.1 Medidas de radônio em águas 49
3.1.2 Cálculo da concentração de radônio em água 51
3.1.2.1 Curva de decaimento do ^{222}Rn e do ^{226}Ra 52
3.1.3 Medidas de Radônio em Rochas 53
3.1.4 Concentração de Radônio em Rocha 55
4 RESULTADOS **58**
4.1 Medidas de Água de Poço **58**
4.2 Medidas de Rochas **60**
4.3 Medidas de Solos **63**
5 CONCLUSÃO **65**
REFERÊNCIAS **67**
APÊNDICE A – GRÁFICOS DAS MEDIDAS DE ÁGUAS DE POÇOS **75**
APÊNDICE B – LISTA DOS PONTOS DE MEDIDAS **80**

1 INTRODUÇÃO

A radiação faz parte do planeta Terra antes mesmo do aparecimento da vida humana. Desde a formação do universo a radiação tem se disseminado pelo cosmo. Embora seja responsável por fenômenos relacionados ao planeta à vida na Terra, somente há pouco mais de um século a descoberta da radiação propiciou seu conhecimento e uso pela humanidade (MAZZILLI *et al*., 2011).

O urânio, o tório são elementos encontrados na crosta terrestre e com o actínio formam às três séries radioativas naturais conhecidas. Seus respectivos isótopos mais abundantes, o ^{238}U e o ^{232}Th possuem meia-vida de 4,5 bilhões de anos e 14 bilhões anos, respectivamente. Em seu decaimento ambos originam outros elementos como o rádio, ao decair gera seu filho de meia-vida curta, o radônio. Esse radionuclídeo se apresenta de forma gasosa sendo encontrado principalmente nos solos. Por ser um gás, se difunde por entre as rachaduras das rochas e pela porosidade/permeabilidade do solo até chegar à camada externa terrestre. Os isótopos do radônio que têm mais influência nas questões ambientais são o ^{222}Rn e o ^{220}Rn, relativos às séries radioativas naturais do ^{238}U e do ^{232}Th. Isto acontece justamente pelo fato de que os elementos precursores destas séries (o urânio e o tório, não excluindo o elemento ^{40}K que ocorre de forma isolada) serem mais abundantes na natureza que outros radionuclídeos naturais. O isótopo do radônio mais abundante (^{222}Rn) possui meia-vida de aproximadamente 3,8 dias, ocorre espontaneamente através do decaimento do rádio (^{226}Ra), que por sua vez se origina do ^{238}U (ATSDR, 2008; UNSCEAR, 2006). O ser humano, desta forma, está exposto à radiação natural e o radônio e seus filhos de meia-vida curta contribuem com uma parcela considerável da dose total recebida por toda população, parcela esta que fica em torno de 50%, a depender do local e da proporção de dose recebida por outras fontes. A dose relativa ao gás radônio está claramente vinculada ao risco associado ao fato de que, ao ser inalado, pode desencadear câncer de pulmão (ATSDR, 2008; MAZZILLI *et al*., 2011; UNSCEAR, 2006).

O ser humano, desta forma, está exposto à radiação natural, o radônio e seus filhos de meia-vida curta contribuem com uma parcela considerável da dose total recebida por toda população, parcela esta que fica em torno de 50%, a depender do local e da proporção de dose recebida por outras fontes (ATSDR, 2008; MAZZILLI *et al*., 2011; UNSCEAR, 2006).

Órgãos internacionais associados à saúde pública, como ICRP 60 (1990), EPA (2000) e UNSCEAR (2000), inclusive ao nível nacional a CNEN (2005), confirmam que o radônio, através de seu decaimento e consequente emissão de partículas alfas (α), podem

causar danos ao nível celular dos tecidos biológicos, resultando em aumento significativo da probabilidade de câncer. Em relação ao câncer de pulmão, o radônio é o segundo agente causador deste de câncer, subsequente ao cigarro, e ao vincular esses dois agentes, o risco pode ser potencializado.

A característica física que mais influência no fato do radônio ter maior parcela na contribuição da dose aos seres humanos é por ser o único gás dentre os elementos das séries radioativas, portanto, ter maior mobilidade. O radônio adentra no corpo humano através de vias aéreas ou pelo aparelho digestivo. Ao sofrer decaimento no organismo, contribui para a dose. A maior contribuição para a dose vem do conjunto (decaimento do radônio e dos filhos de meia-vida curta) nos pulmões. Sendo um gás pesado, tende a permanecer nos pulmões e seus filhos, metais permenecem no tecido pulmonar emitindo radiação/partículas alfa em seus decaimentos subsequentes.

Em menor contribuição para a dose, quando ingerido, o radônio se move pelo trato gastrointestinal cujos tecidos têm menor sensibilidade que o tecido pulmonar, podendo causar danos. Todavia, o radônio cai na corrente sanguínea, e rapidamente é transportado para os pulmões. O radônio restante é conduzido para outros órgãos e tecidos, permanecendo nos mesmos e eventualmente passando pelo processo de decaimento. A contribuição para a dose, neste caso, ocorre principalmente devido à ingestão de água com concentração de radônio expressiva (UNSCEAR, 2000). O Ministério da Saúde, por meio da Portaria n° 2914 de 2011, determina que os valores da atividade alfa total não ultrapasse 0,5Bq/L em uma amostra, sendo esse o mesmo valor estabelecido pela Organização da Saúde (BRASIL, 2006; WHO, 2004).

O teor de radônio em água potável e o radônio proveniente de materiais usados nas construções também contribuem para a elevação da concentração de atividade do radionuclídeo no interior de residências (concentração *indoor*). Todavia, esse valor é baixo se comparado com a quantidade desse isótopo originado do solo onde a residência se encontra (HULKA, *et al*., 2008). Porém, o acúmulo elevado de radônio em água dissemina o gás no ambiente, aumentando assim a concentração de atividade no ar (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001).

A concentração de radônio no ar pode variar conforme: localização geográfica, condições meteorológicas e temperatura, em ambientes fechados, como escolas, escritórios, casas em locais onde a população tende a permanecer com portas e janelas fechadas, normalmente os níveis de radônio são 2 a 20 vezes mais elevados se comparados com ambientes abertos (ICRP, 2005). Um dos fatores que explicam os fenômenos de transporte do

radônio em ambientes fechados é o fato de este gás ser aproximadamente 7,58 vezes mais pesado que o ar e por essa razão se acumular em altura próxima ao solo, contribuindo então para a inalação de radônio pelos seres humanos (ICRP, 1990).

Em países como Noruega, Suíça, Estados Unidos, Reino Unido, dentre outros, para realização de transações imobiliárias são exigidas medidas de radônio (COLGAN *et al.*, 2008). Segundo a WHO (2009), com essa exigência acontece um aumento do mapeamento de radônio nessas regiões. Como resultante, há maior controle da segurança radiológica e implantação de medidas de mitigação passa a ser passíveis onde os níveis de recomendação são excedidos.

Apesar de crescentes, as pesquisas referentes à medição, avaliação e controle de radônio no Brasil são insuficientes se comparadas à quantidade de área habitada pela população brasileira. Há muitos trabalhos na área de radônio (SANTOS, 2010; CORRÊA, 2011; LARA, *et al.*, 2015; NARLOCH, 2015; DEL CLARO, 2016; BONFIM, 2018; MARTIN, 2019, entre outros), mas a quantidade de medições não propicia um mapeamento do território brasileiro, sequer nas áreas mais populosas. Com isso, essa pesquisa tem por interesse tomar conhecimento sobre as concentrações de radônio presentes nas águas de poços, em rochas e solos, encontrados em áreas habitadas na região de Carambeí- Paraná.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de concentração de radônio ^{222}Rn em águas de poços, rochas e solos na região de Carambeí, no estado do Paraná.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Planejamento de coleta de dados /monitoramento sobre radônio na região de interesse;
- Comparar os resultados obtidos com limites estabelecidos regidos por normas internacionais e nacionais;
- Contribuir para base de dados para um Programa Nacional de Risco de Radônio no Brasil e para a Comissão Nacional de Energia Nuclear.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em virtude do grande número de trabalhos científicos em relação à exposição humana à radiação natural, principalmente ao gás ^{222}Rn, pelos malefícios que esta radiação causa em relação à saúde pública e o crescente interesse de órgãos internacionais e nacionais em conhecer os níveis de radônio presentes no ar, solo e água, percebe-se a importância de pesquisas sobre o radônio.

Apesar do controle da qualidade de água distribuída para a população ser uma questão de saúde pública estabelecida, não há protocolos de medições de radônio. Em geral, para águas tratadas, o radônio existente se difunde para o ar ou decai pelo tempo do processo de tratamento até a chegada ao consumidor. Em geral, isto não acontece no uso de água de poços utilizada pela população, principalmente em regiões afastadas dos centros urbanos, as quais em sua maioria não há tratamentos que provoquem a difusão do radônio ou que demorem tempo suficiente para o decaimento de parte expressiva do gás.

Há uma influência dos solo e rochas na concentração de radônio nas águas de poços, pois solos ricos em urânio e tório consequentemente exalam radônio que adentra nas águas adjacentes. No entanto, esta relação depende do tipo do isótopo existente e de características físicas naturais do solo.

Com isso, é importante realizar pesquisas com a finalidade de contribuir com o conhecimento da qualidade da água em relação ao radônio que está sendo consumida por moradores de regiões que utilizam água de poço para o consumo. A área rural de Carambeí, no estado do Paraná, possui várias chácaras e sítios onde moradores utilizam a água de poço como fonte de água potável.

Ressalta-se que a exposição humana à radiação natural é inevitável. Mas o monitoramento das características que aumentam o nível de exposição é imprescindível. Assim, havendo um valor acima do recomendado, medidas mitigatórias podem e devem ser tomadas para que a dose recebida, e no caso desta pesquisa, a dose do radônio e seus filhos pela população sejam reduzidas.

Considerando que o radônio é um dos principais radionuclídeos que propiciam dose recebida pelos seres humanos ao longo de sua vida e que o radônio é o segundo maior causador de câncer de pulmão, ficando atrás somente do cigarro e ainda por conta dos fatos apresentados acima, considera-se que a avaliação de radônio em águas de poços, rochas e solos na região de Carambeí/PR é pertinente e assim, justifica-se esta pesquisa.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas últimas décadas observa-se um aumento de número de trabalhos científicos relacionados a exposição humana à radiação. Este aumento é percebido pelas inúmeras publicações relacionadas a este assunto em documentos dos principais órgãos reguladores internacionais e nacionais: ICRP (1991), EUROPEAN (1999), UNSCEAR (2000), EPA (2001), CNEN (2005), WHO (2009). Nestes documentos há ênfase ao gás ^{222}Rn, que contribui com doses significantes de radiação aos indivíduos, o que consequentemente gera um aumento na preocupação em relação à saúde pública.

Este interesse voltado à relação entre o radônio e a saúde pública é ressaltado pelos órgãos internacionais e nacionais já mencionados. Especificamente em sua publicação 126, o ICRP (2014), bem como a UNSCEAR (2000) e a CNEN (2005), tornam explícito que a exposição ao ^{222}Rn pode desencadear câncer no pulmão. Esta relação entre a exposição ao radônio e o câncer de pulmão também é foco de publicações de outros vários documentos internacionais (UNSCEAR, 2000; EPA, 2001; ICRP, 1993; WHO, 2009; EUROPEAN COMMISSION, 1999).

Pesquisa internacionais sobre o radônio com foco nas concentrações do gás em ambientes, águas, solos e materiais têm sido feitas como a de Neznal e Neznal (1997) na Republica Tcheca, Barazza *et al.*(2012) na Suíça, Oikawa *et al.,* (2003) no Japão, Espinosa *et al.,* (1999) no México, Alabdula'Aly (1999) na Arábia Saudita. No Brasil também existem trabalhos voltados ao mapeamento nacional de radônio. Todavia, ainda não existem dados suficientes para um mapeamento completo. E mesmo frente os estudos existentes sobre radônio, não há uma compilação que possa gerar um mapeamento inicial.

Em termos nacionais, embora com características locais, há pesquisas sobre radônio em Belo Horizonte por SANTOS (2010). Em São Paulo Neman (2000); Geraldo (2005); Silva (2005); Marques (2006); Artur (2013). Na Bahia Costa *et al.*, (2012); Brito (2013); Nogueira (2018). No Rio Grande do Norte Campos *et al.*, (2013). No Ceará Azevedo (2013). No Rio Grande do Sul Fianco (2011); Giuliani (2015); Santos (2017). No Paraná Perna *et al.* (2018); Del Claro *et al.*, (2019); Martin (2019); Narloch *et al.,* (2019) e Corrêa *et al.,* (2020).

Nesse contexto, salienta-se que há inúmeros trabalhos sobre radônio ao nível mundial e nacional, mostrando a importância do tema e indicando a necessidade de compilação dos dados nacionais.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada em residências e solos na cidade de Carambeí, no estado do Paraná, especialmente na área rural. As medições tiveram foco em residências que possuem poços, onde foram coletadas amostras de águas e também amostras de rochas encontradas ao redor dos poços e foram feitas medições de exalação de radônio do solo dos locais.

As medidas de radônio foram realizadas no segundo semestre de 2019 e se estenderam até o primeiro semestre de 2021. As medições foram feitas através de detector/monitor instantâneo, que possui câmara interna de ionização, focado na detecção de partículas alfa advindas do decaimento do radônio.

As análises foram feitas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, localizada na cidade de Curitiba, que possui estrutura própria para medições de radônio.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada da seguinte forma:

No capítulo 1 é apresentada uma pequena introdução sobre o tema em questão e sua problemática, o objetivo do estudo de forma geral e específica, a justificativa, a contextualização e a delimitação do trabalho.

O capítulo 2 mostra o embasamento teórico onde a dissertação foi baseada por meio da revisão de literatura que apresenta conhecimentos pertinentes para os procedimentos metodológicos desse trabalho.

No capítulo 3, se trata dos detalhes da metodologia empregue no desenvolvimento desse trabalho.

Já no capítulo 4, trata dos resultados obtidos e discutidos com base na literatura.

O capítulo 5, engloba as considerações finais dos resultados do trabalho. E ao final são apresentadas as referências usadas durante todo o desenvolvimento da pesquisa, com os apêndices A e B.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O conteúdo desse capítulo é apresentado de forma resumida através de uma revisão sobre a radioatividade natural, o radônio e suas propriedades, e a relação da exposição do radônio com os efeitos biológicos. Esta revisão engloba os fundamentos da questão e também o estado da arte, tendo como base as principais publicações atuais sobre o assunto.

2.1 Radioatividade Natural

Os seres humanos estão expostos à radiação ionizante, com origem cósmica, com menor contribuição, e à radiação que provém da crosta terrestre, com maior contribuição, além da exposição devida ao uso de equipamentos ou fontes artificias. A radiação relativa à crosta terrestre é intrínseca ao planeta Terra (EISENBUD e GESELL, 1997; UNSCEAR, 2000; NNDC, 2015).

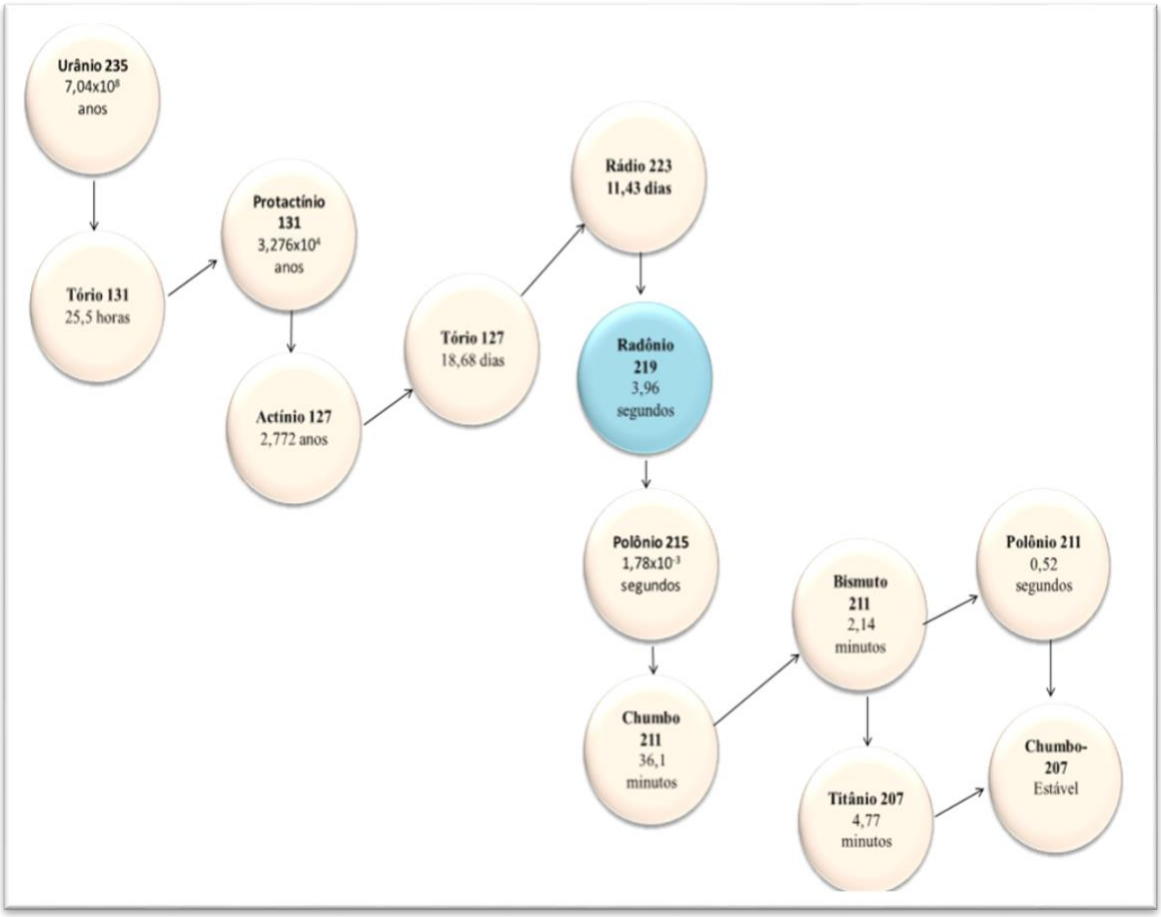
Os elementos radioativos naturais, *Naturally Occurring Radioactive Materials* (NORM) são primordiais e cosmogênicos e estão presentes em águas subterrâneas, rochas, solo, ar, materiais (principalmente materiais de construção) e consequentemente no organismo humano. Os radionuclídeos que apresentam tempo de meia-vida aproximado ao tempo de existência da Terra são mais abundantes, em conjunto com seus filhos apresentam no seu decaimento em parte séries radioativas. Exemplo disso são os principais radionuclídeos primordiais frutos do decaimento do urânio (^{238}U), do tório (^{232}Th), do actínio (^{235}U) e do potássio (^{40}K) que de forma isolada, têm abundância considerável (UNSCEAR, 1962; EISENBUD e GESELL, 1997; UNSCEAR, 2000).

A UNSCEAR, em sua publicação de 1962, chamou a atenção para que os elementos ^{238}U e ^{232}Th são encontrados em concentrações maiores, relativamente, em vários países como Austrália, Canadá, Estados Unidos, África, Brasil entre outros países. O ^{40}K também está entre os elementos relativamente com grandes proporções na natureza (UNSCEAR, 1962).

A exposição à radiação pode ocorrer de duas formas: interna e externa. A exposição interna acontece através da inalação e ingestão de radionuclídeos. Esta exposição está relacionada às partículas resultantes principalmente dos decaimentos dos radionuclídeos das séries do ^{238}U e do ^{232}Th, que possuem meia-vida de 4,5 bilhões de anos e 1,4 bilhões de anos, respectivamente, que como mencionado, é um fator preponderante para sua existência e de seus filhos parte das séries radioativas.

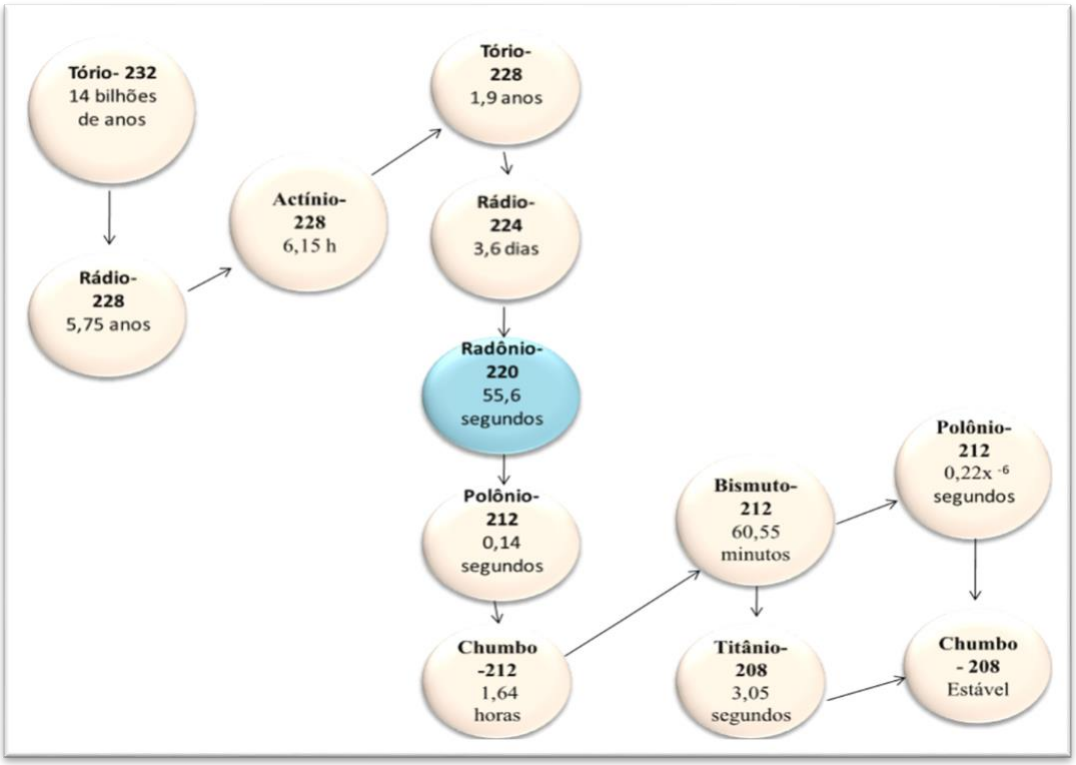
As séries de decaimento radioativo provenientes do urânio, tório e actínio, com os tempos de meia-vida de cada elemento e as partículas emitidas a cada decaimento, são representadas nas figuras 1, 2 e 3.

Figura 1- Série radioativa ^{235}U



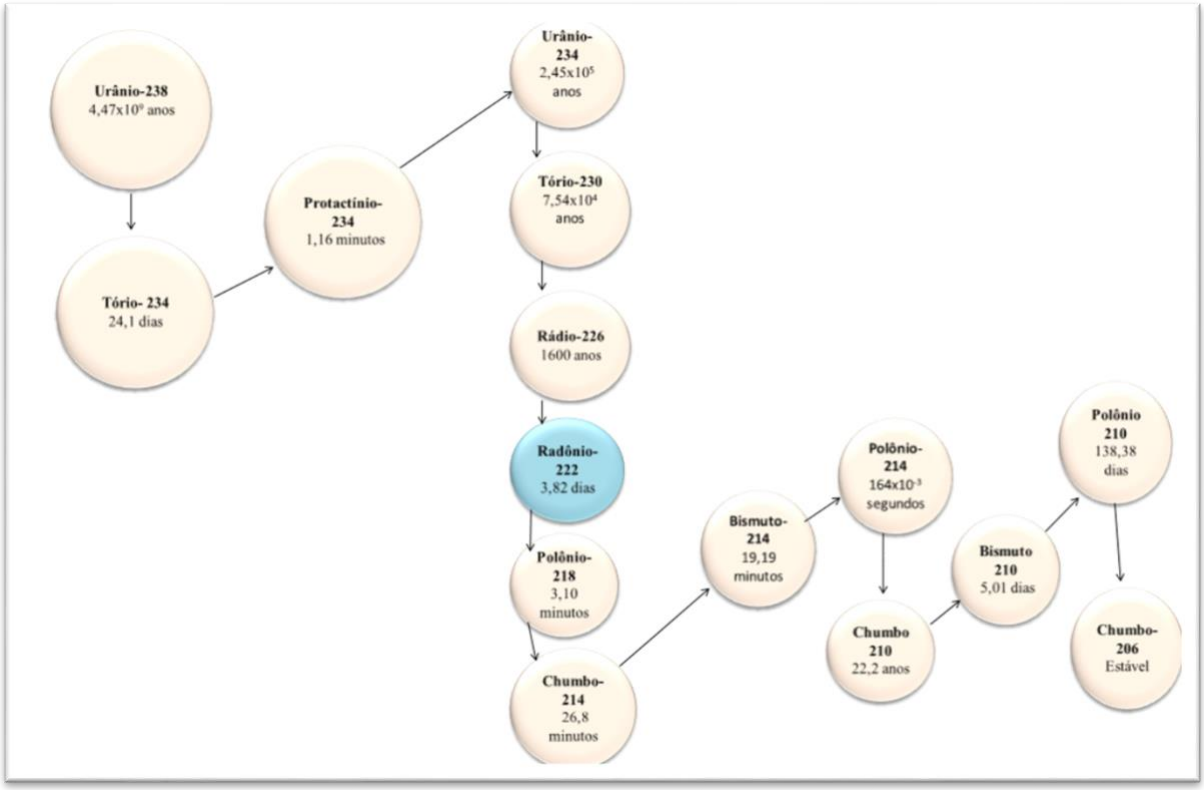
Fonte: Adaptado de NNDC (2019).

Figura 2 - Série radioativa do ^{232}Th



Fonte: Adaptado de NNDC (2019).

Figura 3 - Série radioativa do ^{238}U



Fonte: Adaptado de NNDC (2019).

Com relação ao radônio, a exposição externa pode ocorrer ao ar livre (*outdoor*), advinda da radiação proveniente do solo devido a sua composição. Em ambientes internos (*indoor*) a dose tende a ser maior que a externa por conta da contribuição radiação que provém dos materiais de construção e também do próprio solo, devido à pressurização negativa das fundações da edificação. Outro fator que influencia a maior exposição é o tempo que o indivíduo permanece no local. Em ambientes internos a taxa de concentração do radônio está relacionada: a quantidade de ^{226}Ra no solo, permeabilidade do solo, pressão interna, externa e taxa de ventilação no ambiente. As casas construídas em madeira apresentam menor quantidade de exposição do que as casas de alvenaria (EISENBUD e GESELL, 1997; UNSCEAR, 2000).

Em termos de dose, o radônio é o elemento que mais deve ser considerado no que se refere à inalação, pois tem meia-vida suficiente para causar exposição por emissão alfa. A ingestão de alimentos e água também causam exposição por conter elementos resultantes das cadeias do ^{238}U e ^{232}Th e pela presença do ^{40}K (EISENBUD e GESELL, 1997; UNSCEAR, 2000; NNDC, 2011).

Existem também a radiação de fundo (*background*), que em algumas regiões do Brasil apresentam nível elevado, como nas areias monazíticas com abundância de tório em Guarapari no Espírito Santo e os solos vulcânicos em Poços de Caldas em Minas Gerais (UNSCEAR, 2000).

Em relação ao ^{226}Ra o mesmo existe em quase todos os solos e rochas, porém em quantidades variáveis. As rochas que possuem os níveis de concentração de ^{226}Ra são as rochas ígneas quando comparadas às rochas arenosas e rochas calcárias. Já em águas a quantidade de rádio se deve a fatores geológicos e geoquímicos. Esses fatores influenciam principalmente a concentração de dois principais isótopos ^{226}Ra e ^{228}Ra, filhos do urânio e do tório, respectivamente. Na natureza, há maior quantidade de ^{232}Th do que ^{238}U, em relação a sua atividade, os fatores geoquímicos propiciam maior concentração de ^{226}Ra em comparação ao ^{228}Ra (EISENBUD e GESELL, 1997). Quando há presença de radônio no solo, isso indica haver também a presença de rádio e seu percursor, o urânio (KUMAR *et al.,* 2008).

Em águas de consumo humano existe grande interesse na quantidade de rádio presente, pois diversas pesquisas apontam que principalmente em águas de poços, a quantidade de rádio é maior que o limite estabelecido pela UNSCEAR (2000).

Já em relação ao tório, a sua concentração em rochas, principalmente na crosta, é cerca de quatro vezes a concentração de urânio. Em solos que apresentam altos níveis de radiação de fundo, as contribuições dependem das condições geológicas e efeitos

geoquímicos que induzem o aumento da radiação terrestre. Ao ser comparado com trabalhos de pesquisas ao redor do mundo, o Brasil, por sua composição geológica apresenta concentrações e condições similares a países que merecem atenção quanto á radiação natural (EISENBUD e GESELL, 1997; KUMAR *et al*., 2008).

2.2 Efeitos Biológicos Relativos à Radiação Natural

As radiações ionizantes são caracterizadas por apresentarem energia suficiente para interagir e ionizar átomos e moléculas do corpo humano. Esse processo de ionização pode causar quebra do Ácido Desoxirribonucleico (DNA) e também degenerações em organelas celulares ou outros componentes, causando danos estruturais e até mesmo funcionais. Os efeitos vão desde a destruição da célula até a alteração na sua estrutura. Assim, esses efeitos podem ter consequências em curto prazo ou tardias (UNSCEAR, 1993).

Quando a radiação interage com o DNA e modifica sua estrutura é considerada uma ação direta, causando aparecimentos de anomalias cromossômicas. Já na ação indireta, a radiação não interage diretamente com o interior do DNA, mas ainda pode causar radiólise, que ocorre quando a radiação interage com as moléculas de água do organismo, que resulta em radicais livres que acoplam a outras moléculas do meio causando danos irreversíveis (UNSCEAR, 1993; OKUNO e YOSHIMURA, 2010; TILLY JUNIOR, 2010).

Os efeitos biológicos causados pela radiação podem ser somáticos, ou seja, podem se manifestar durante a vida do indivíduo e ainda pode ser passados para sua próxima geração (TILLY JUNIOR, 2010; OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

A probabilidade dos efeitos ser de ações diretas ou indiretas depende da dose absorvida. Quanto maior a dose maior o dano, essa probabilidade deve ser considerada, já que danos nas estruturas do DNA podem ocorrer também por outros eventuais erros, como a replicação desordenada na divisão celular (UNSCEAR, 1993).

Ao decair, os radionuclídeos das séries de ^{238}U, ^{235}U e ^{232}Th emitem partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ) com energias ionizantes na interação com o meio. A quantidade de energia depositada ou transferida está relacionada à distância percorrida no ar, que pode ser observada na tabela 1. Essa quantidade de energia é denominada LET (*Linear Energy Transfer*). Ressalta-se também que essa quantidade de energia difere entre partículas e fótons. A intensidade das mutações celulares depende se a radiação é de alto ou baixo LET. De modo geral, radiações de alto LET como as do radônio, que ao decair emitem partículas α que causam mais quebras do DNA por conta da sua energia (5,5MeV—cerca de 4cm de alcance)

transferida aos tecidos (UNSCEAR, 2006; TILLY JUNIOR, 2010; OKUNO e YOSHIMURA).

Tabela 1 - Energia da partícula α em relação a distância percorrida

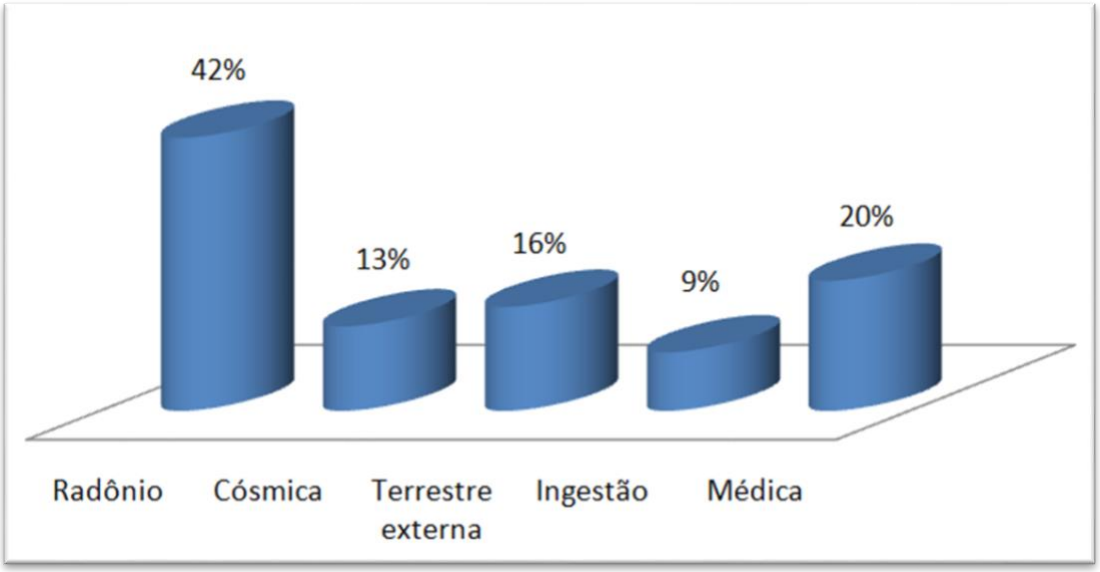
Energia da partícula (MeV)	Alcance no ar (cm)
1	0,55
2	1
3	1,8
4	2,6
5,34	3,9

Fonte: Adaptado de OKUNO e YOSHIMURA (2010).

Como o radônio ocorre de forma natural, através de águas, solos, rochas e materiais de construção, enfatizam-se a importância da preocupação da exposição do ser humano à radiação natural.

Em estudos realizados sobre o radônio e seus filhos constata-se que estes radionuclídeos são responsáveis por cerca de metade da dose recebida pela população mundial ao longo de suas vidas, conforme ilustra a figura 4. Esses estudos ainda salientam que ao ser exposto por um longo período a concentrações maiores que 200Bq/m³, há aumento crítico do risco de desenvolver neoplasia pulmonar (ICRP, 2010).

Figura 4 - Percentual de dose recebida pelos seres humanos decorrente de radiação natural e artificial conhecida



Fonte: Adaptado de UNSCEAR (2008).

De modo geral, pacientes quando diagnosticados com neoplasia pulmonar já estão com a doença avançada, pelo fato deste tipo de câncer apresentar poucos sintomas. O prognóstico dessa patologia depende do estadiamento que define o grau da gravidade e sua extensão e do resultado do estudo histológico do câncer, através da biópsia de cada caso (SES-MG, 2013; INCA, 2016).

A Organização Mundial da Saúde (WHO), através da sua agência especializada em estudos de neoplasias a *Internation Agency for Research on Cancer* (IARC), publica regularmente relatórios sobre substâncias consideradas (ou não) com potencial cancerígeno. Dentre as divisões dos 4 grupos de riscos existentes, o ^{222}Rn está introduzido no Grupo 1, que contém agentes carcinogênicos quando há exposição e interação dos tecidos humanos em um certo período e frequência em que ocorre essa exposição (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1996; IARC, 2021; IARC, 2014).

Segundo a IARC (2010), a categoria do Grupo 1 é atribuída aos agentes aos quais há evidências consideráveis de carcinogenicidade nos seres humanos. Essas evidências são fundamentadas em experimentos feitos com animais e há fortes indícios de que em humanos expostos aos agentes, estes agem para provocar, com grande relevância, a carcinogenicidade.

Documentos da IARC (2014), que tratam de estudos epidemiológicos, dizem que a exposição à radiação está relacionada ao surgimento de neoplasias na tireoide, pulmões, glândulas salivares, estômago, mama, esôfago, entre outras estruturas. Já a exposição ao radônio e seus filhos está mais intimamente relacionada ao câncer no pulmão, leucemia e ao linfoma.

O ^{224}Ra e os produtos de seu decaimento estão relacionados, em menor escala, ao câncer nos ossos e seios paranasais. O ^{232}Th, por sua vez, tem vínculo às neoplasias do fígado e dos ductos biliares (COGLIANO *et al*., 2011).

2.3 DOSE

Os danos à saúde decorrentes à exposição do homem à radiação dependem da absorção da energia da radiação, serem cerca de proporcionais à concentração de energia absorvida pelo organismo. A dose absorvida (*D*) é uma grandeza física que no Sistema Internacional (SI) é dada em joule por quilograma (J/kg), sendo que também pode ser representada pela unidade gray (Gy) (ICRP, 2012).

Os diferentes tipos de radiações podem lesionar o mesmo tipo de matéria viva de formas distintas. A dose equivalente (H), com unidade (SI) de medida sievert (Sv), considera

essas diferenças. Para que a dose equivalente seja distinguida com relação à essas diferenças é essencial usar o fator de qualidade (Q), conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Fator de qualidade efetivo

Tipos de Radiação	Q
Raios X	1
Raios γ	1
Radiação β- e β+	1
Partículas α e demais partículas com carga superior a uma unidade de carga	20

Fonte: adaptado de ICRP (1977) e CNEN (2011).

Quando há interação com a radiação, devem ser consideradas as diversas características dos tecidos do corpo humano, sendo que cada tecido deve ser estudado para distinguir a dose equivalente. O fator de modificação (N) difere as maneiras onde os tecidos absorvem as radiações. Esse fator, combinado com o fator de qualidade, resulta na dose equivalente (H), como descrito na equação 1.

$$H = D.Q.N \qquad \text{Eq 1}$$

Neste sentido, a dose é a grandeza que permite associar os efeitos das radiações aos seres vivos, pois considera tanto características da própria radiação quanto características dos tecidos vivos, tendo como base os conceitos de interação da radiação com a matéria e efeitos biológicos. As doses limites estão, portanto, relacionadas a estes fatores.

Especificamente ao radônio, descrito de forma detalhada em itens subsequentes, a dose máxima anual utilizada como referência estabelece concentrações limites as quais o ser humano pode ser exposto.

2.4 Radônio

Historicamente, ao longo dos tempos riscos à exposição ao radônio era associado às minas subterrâneas, porém, somente após 1970 os cientistas identificaram que a exposição em ambientes fechados como prédios, residências, entre outros (*indoor*) poderia ser alta a ponto de se igualar a exposições em minas. Desde então, pesquisadores buscam compreender o

processo de exposição e as doses recebidas pela população (UNSCEAR, 2000). Conforme o documento publicado em 2010 no Reino Unido pela *Health Protection Agency* (HPA, 2010), o indivíduo exposto a concentrações de gás radônio têm maior probabilidade de adquirir câncer de pulmão, quanto maior for esta concentração. Esta conclusão é baseada em indícios resultantes de estudos epidemiológicos da exposição de mineiros ao radônio, cálculos dosimétricos e experimentos com animais.

O ^{222}Rn possui meia-vida, de 3,8 dias e ocorre naturalmente após o processo de decaimento do ^{226}Ra. Esses radionuclídeos fazem parte da família radioativa do ^{238}U, presente em rochas e solos. Do mesmo modo, o ^{224}Ra é resultado do decaimento por emissão de partícula α do ^{232}Th que resulta o torônio (^{220}Rn), que também é um isótopo do radônio. Entretanto, esse isótopo possui meia-vida curta, de apenas 54 segundos. Os isótopos de radônio são classificados como gases nobres, formando moléculas monoatômicas inertes. Entretanto, podem se acoplar em partículas suspensas no ar e serem inalados (EISENBUD e GESSEL, 1997; WHO, 2011; CELA, 2014).

Ao decair, o radônio emite partículas alfa (α) de energias que variam entre 4 a 7 MeV (mega elétron-volt), e os produtos do seu decaimentos que são seus filhos de meia-vida curta, têm meias-vidas que seguem descritas na tabela 3. Após adentrar nas vias aéreas, o radônio (gás) ao decair gera uma série de outros radionuclídeos (metais) que ao final do decaimento produzem um metal pesado estável, o chumbo (^{206}Pb).

Tabela 3 - Decaimento do ^{222}Rn

Nuclídeos	Meia-vida($T_{1/2}$)
^{222}Rn	3,82 dias
^{218}Po	3,10 minutos
^{214}Pb	26,8 minutos
^{214}Bi	19,19 minutos
^{214}Po	164.10^{-3} segundos
^{210}Pb	22,2 anos
^{210}Bi	5,01 dias
^{210}Po	138,38 dias
^{206}Pb	**Estável**

Fonte:Adaptado de NNDC (2019).

Os riscos relacionados à interação das partículas α advindas do ^{222}Rn inalado e a outros radionuclídeos filhos desse decaimento se devem à interação das emissões com os tecidos biológicos do trato respiratório, acarretando danos prováveis ao DNA das células.

Esses danos podem estimular o desenvolvimento de tumores ou câncer no pulmão (WHO, 2011).

Assim como o ^{222}Rn causa danos nos tecidos biológicos, o ^{220}Rn também emite partículas ionizantes (α) que interagem e causam também danos aos tecidos pulmonares. Porém, como o tempo de meia-vida do ^{220}Rn é mais curto, detectar a concentração desse nuclídeo é mais difícil, se tornando também mais difícil a inalação (ICRP, 2014).

Como já mencionado, o rádio por processo de decaimento emite uma partícula alfa gerando o radônio e pode ser encontrado nas matrizes do solo, especialmente em minerais como a Pechblenda. Porém, ao decair, o rádio produz como filho direto o radônio, liberado da matriz sólida do material pelo recuo (*recoil*). O gás radônio, que evidentemente possui maior mobilidade, então se difunde pelo material. O movimento do átomo de radônio do interior até o espaço poroso do material, iniciada pelo *recoil* é chamado emanação. Após esse processo, a movimentação do gás do meio poroso até a atmosfera é denominado como exalação (SANTOS, 2008; SAKODA *et al*., 2011).

Assim, de forma geral, o radônio chega na atmosfera por processos de difusão e há maior facilidade em realizar medições desse radionuclídeo quando comparado ao rádio. Dessa forma, frequentemente medições de radônio são usadas para inferir a quantidade de rádio e de urânio no local. Isso só pode ser realizado pelo equilíbrio secular entre os dois elementos. O equilíbrio secular acontece, por exemplo, quando os isótopos de radônio ^{222}Rn, ^{220}Rn e o ^{219}Rn que possuem meias-vidas de 3,8 dias, 59 segundos e 4 segundos, respectivamente, enquanto comparados aos seus antecessores, ^{226}Ra, ^{224}Ra e ^{223}Ra, com meia-vida em torno de 1600 anos ambos, ficam com as atividades consideradas iguais, após cerca de 7 meias-vidas do elemento filho (TURNER, 2007).

Por possuir a característica de ser inerte, o radônio ao ser inalado pode ter boa parte expelida pelo organismo. A parte que permanece nos pulmões ou é absorvida pelo organismo pode sofrer um decaimento, dando origem aos seus filhos de meia-vida curta e não gasosa que se prendem aos tecidos pulmonares que recebem as energias provenientes do decaimento alfa em cadeia aumentando consideravelmente a perspectiva de câncer (TURNER, 2007; WHO, 2009).

Dessa maneira, fica evidenciado que o radônio é relacionado ao câncer de pulmão, sendo este radionuclídeo o segundo principal agente causador deste tipo de câncer, ficando para trás somente do cigarro. Ao vincular esses dois agentes, o risco pode ser potencializado (UNSCEAR, 2000; ICRP, 2014).

A WHO (2009), baseada nas disposições de órgãos reguladores, ressalta haver limites estabelecidos para concentrações de radônio em ambientes de convívio humano. Apesar desses limites serem estabelecidos com relação a esse elemento, o documento observa que os limites consideram toda a dose que o ser humano é exposto na série de decaimento dos seus filhos, sendo esses limites de 300Bq/m³.

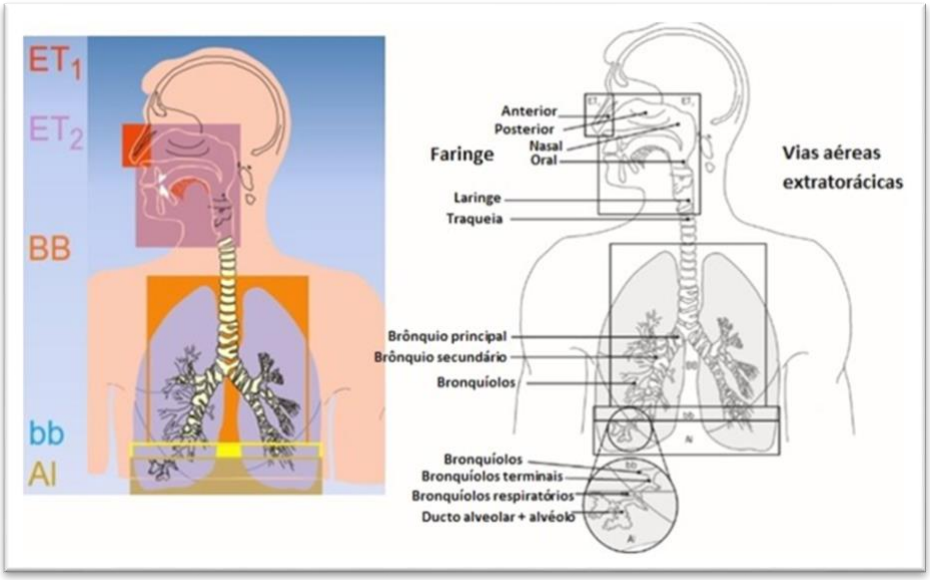
2.5 Efeitos Biológicos Relativos Ao Radônio

As partículas de radônio que adentram no trato respiratório podem ser quantificadas através de estimativa indireta considerando informações da saturação de oxigênio do indivíduo, tamanho das partículas dos aerossóis e sua distribuição, entre outras informações. Para entender a interação da radiação com as células dos tecidos biológicos, são utilizados modelos dosimétricos e biocinéticos, sendo que o modelo dosimétrico que mais se destaca é o *Human Respiratory Tract Model* (HRTM), figura 5, criado pela ICRP em combinação com ferramentas que auxiliam nos cálculos de doses (BAILEY *et al*., 2003; UNSCEAR, 2010).

O modelo dosimétrico que representa o trato respiratório humano possui divisões, com base na radiossensibilidade dos tecidos. As regiões extratorácicas (ET) subdividem-se em frente do nariz (ET_1), faringe e laringe (ET_2) que contemplam a cavidade nasal e oral posterior. A região torácica (BB) contempla os pulmões, traqueia, brônquios e bronquíolos. E na região intersticial alveolar (AI), localizam-se os alvéolos (BAILEY *et al*., 2012).

As regiões do modelo destacam as células alvo para ser avaliada a radiossensibilidade dos diferentes tipos celulares para cálculos das doses. Na região ET, as células alvo são as basais do epitélio. Nos brônquios (BB), as células mais sensíveis à radiação são também as células basais e as secretoras do epitélio (BAILEY *et al*., 2012).

Figura 5 - Modelo dosimétrico HRTM



Fonte: Del Claro (2016), adaptado de Harrison (2014) e Bailey *et al*., (2012).

Por ser um gás não reativo, o radônio que não decai nos pulmões é expelido ao ser inalado. Com menor expressão, por ser um gás pesado, o transporte do gás para fora dos pulmões acontece de forma menos intensa que dos gases em geral. Desse modo, a quantidade de decaimentos do gás nos pulmões pode ser considerada pequena. Mas, seus filhos são isótopos de elementos radioativos. Esses elementos filhos, todos metais, se fixam na pleura e suas emissões provocam sérios danos aos pulmões. Há alguma contribuição desses elementos filhos, proveniente do decaimento do radônio na atmosfera, que estão associados à aerossóis que ao serem inalados também contribuem para a dose (SPIRO e STINGLIANI, 2009).

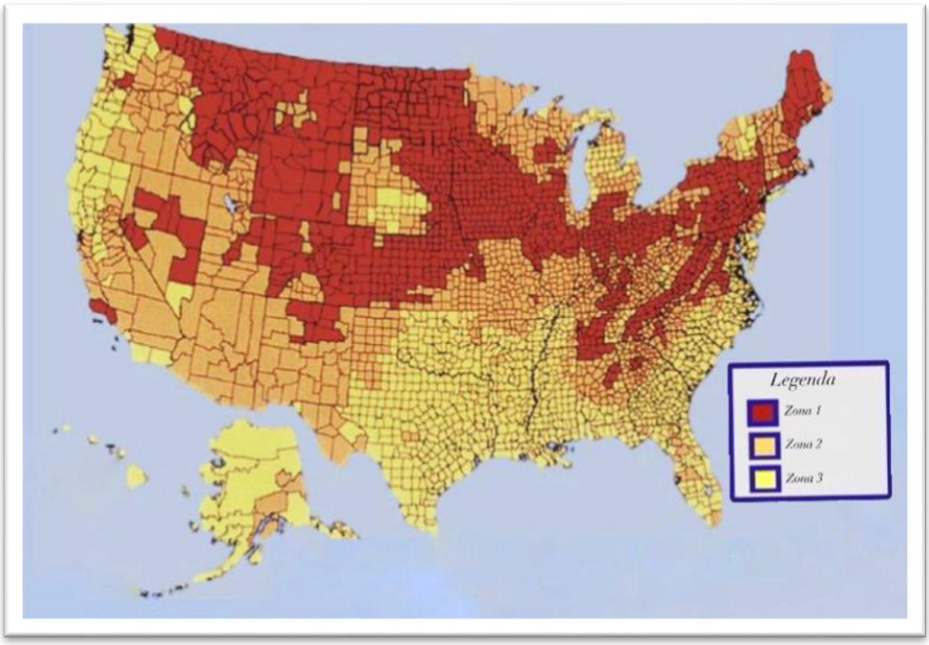
Cada tipo de célula biológica possui uma vulnerabilidade aos efeitos da radiação ionizante. Os ácidos nucleícos, que formam o código genético das células são mais suscetíveis a estes efeitos. Com isso, uma única ionização pode provocar erro nas combinações dos componentes proteicos da célula, considerando que as combinações vindas após desse erro transformam células normais em células cancerígenas, considerando haver comprovações em que há incidências de câncer após exposição à radiação (SPIRO e STINGLIANI, 2009).

A exposição ao gás radônio pode aumentar o risco de desenvolver câncer em 8% a 16%, em cada aumento de 100Bq/m³ na concentração de radônio, visto que os níveis do gás mudam conforme a composição do solo, a localidade e as rochas (SCHMID, KUWERT e DREXLER, 2010).

A EPA (*United States Environmental Protection Agency*) (2006), considera que uma a cada quinze residências dos Estados Unidos apresenta níveis de radônio acima do que o recomendado, de 4pCi/L, o equivalente a 148Bq/m³.

A figura 6, indicam os níveis de diferentes concentrações de radônio em residências.

Figura 6 - Mapa das contrações de radônio nas residências dos EUA



Fonte: Adaptado de EPA (2006).

Segundo a EPA, o estado de Iowa, possui a maior média de concentração de radônio, em média é de 8,8pCi/L, dentre os estados americanos. (FIELD, STECK e SMITH, 2000; EPA, 2005). Como na figura 6 que mostra as diferentes concentrações em residências dos EUA. Onde a zona 1, municípios com níveis de radônio *indoor* maiores do que 4pCi/L, a zona 2, municípios com níveis médios de radônio *indoor* de 2 a 4pCi/L e a zona 3, municípios com níveis médios de radônio *indoor* inferiores a 2pCi/L.

O IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), diz que as concentrações de radônio na atmosfera do Brasil varia de 0,6 a 28Bq/m³.

Já no Brasil, mesmo não tendo uma lei específica para o radônio, a CNEN tem normas regulamentadoras que estabelecem valor limite para a exposição de até 300Bq/m³. O Ministério da Saúde, através de pesquisa de Afonso (2009), indica que o valor limite de radiação α é de 0,1Bq/m³ (incluso o isótopo de ^{226}Ra, percursor do ^{222}Rn) e 1Bq/m³ para radiação β (BRASIL, 2006).

2.6 Radônio em Águas Subterrâneas

As concentrações mais elevadas em águas subterrâneas estão ligadas a altos níveis de ^{226}Ra das rochas. As rochas que apresentam menor concentração do gás geralmente são as

sedimentares, já as rochas que apresentam maiores concentrações são as cristalinas, em particular o granito (EISENBUD e GESELL, 1997).

Segundo pesquisas realizadas pela EPA (2000) sobre concentrações de radônio em amostra de águas subterrâneas advindas de rochas sedimentares, geralmente, apresentam baixas concentrações. Entretanto, há estudo nesse mesmo documento que mostram águas de uma comunidade pequena em que está localizada nesse mesmo tipo de rocha, demonstram altos níveis de concentrações de radônio. Com isso, se torna imprescindível o estudo, tendo em vista que em pequenas comunidades, pode ser que águas de poços utilizados em residências possuam caminhos curtos, chegando rapidamente para o consumo, em que não há tempo de decair no percurso.

Documentos da comissão europeia, recomendam que a concentração de radônio em águas em superfície seja inferior a 1Bq/L. Já para poços escavados estabelece 10 a 300Bq/L e por último em águas de poços vindas de rochas cristalinas os limites são de 100 a 50.000 Bq/L (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001).

A EPA (2000) limita o ^{222}Rn em água potável em 11,1Bq/L, sendo que esse limite já está incluso à possível contribuição da água para a atmosfera dos ambientes *indoor*. As concentrações acima de 148Bq/m³ já estão em estado de atenção, (EPA, 2000) e 200Bq/m³ (ICRP, 1993). Em contrapartida, à EPA, a COMMISSION RECOMENDATION (2001) da comissão europeia recomenda que seja o valor de 100Bq/L, mas o limite para intervenção é de 1000Bq/L.

No Brasil, a CNEN (2005) aconselha genericamente que concentrações de 10 mSv/a, tenha intervenção. Esse valor equivale a 300Bq/m³ para radônio em ambientes internos segundo cálculos do ICRP (2008).

Nota-se que os limites de radônio em águas e as suas contribuições para ambientes podem ser bem distintas, como descrito nas metodologias mencionadas. Então, os limites geram debates, com base nas evidências de que as águas contribuem em pequena parcela no aumento da concentração de radônio *indoor,* mas além de ser pequena, pode ser influenciada por conter muitas variáveis.

2.7 Radônio em Ambientes Internos

O ^{222}Rn está presente em ambientes internos (*indoor*) pelo fato do solo possuir radionuclídeos provenientes das séries de urânio e tório. Por ser um gás, difunde pelas rachaduras e poros do solo, paredes e janelas. Em águas provenientes de poços, considerando

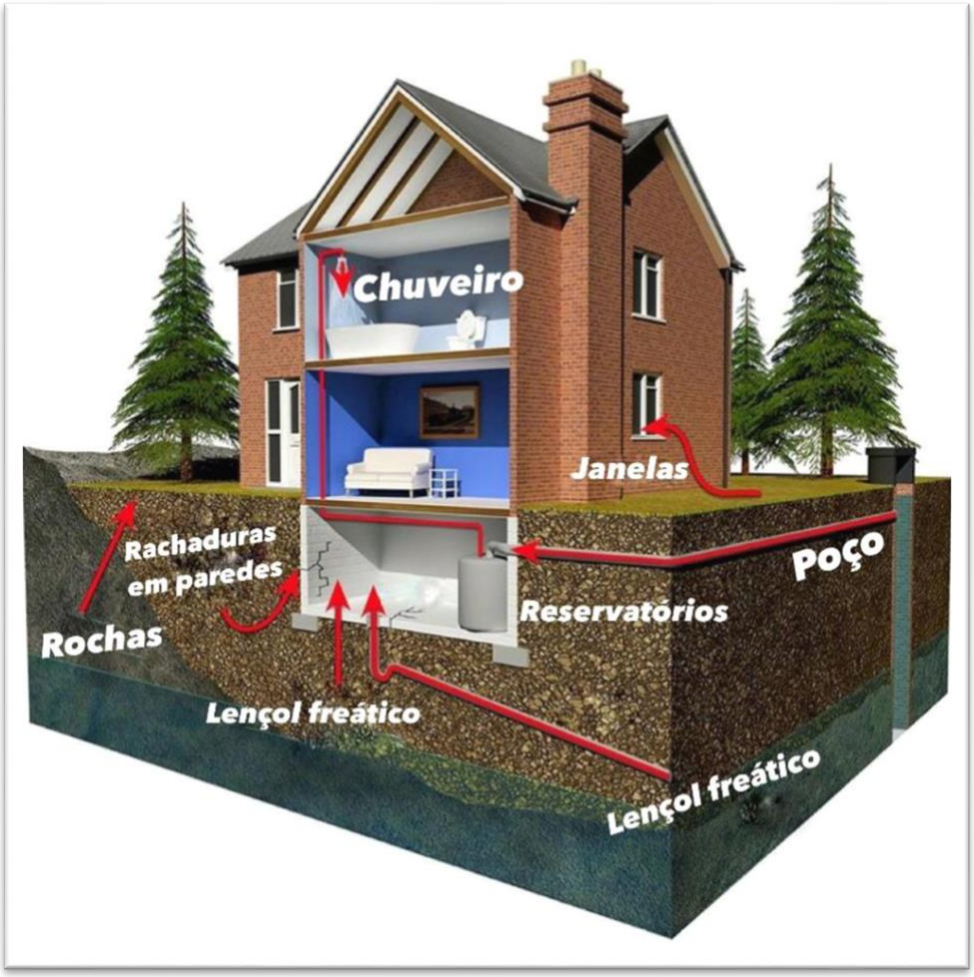
que o ^{222}Rn pode se acumular nessas águas, ao chegar nas torneiras e chuveiros da residência o gás se solta das partículas de água e vai para a atmosfera. Deve-se considerar que os materiais utilizados na construção das casas de alvenaria também afeta na exalação do radônio *indoor* (EPA, 2001; WHO, 2004).

As concentrações de radônio presente nas residências dependem de diversos fatores: hora do dia (provavelmente relaciona à gradientes de temperatura) e pelo fato de que a noite as residências tendem a ficar mais fechadas potencializando a concentração de ^{222}Rn, temperatura em geral, umidade, fenômenos de transporte de água, diferença da pressão entre os ambientes externos e internos, fissuras presentes em residências, permeabilidade do solo e porosidade dos materiais de construção, conforme a figura 7. Para que os resultados de investigações sejam fidedignos, é necessário que as medidas indoor sejam realizadas durante três meses pelo menos (EISENBUD e GESELL, 1997; ARAÚJO, 2003).

Para ambientes internos, órgãos como a WHO (2009) estabelecem o valor de 100Bq/m³, para que os danos à saúde sejam minimizados, já que esses danos geram preocupação a saúde pública. Mas, em alguns países, por conta das condições locais, pode ser usado o valor de referência é de 300Bq/m³; entretanto esse valor não deve ser ultrapassado.

Os limites de concentração de radônio em ambientes internos segundo a ICRP (1993), até 200Bq/m³ é considerado um valor normal, 200 a 400Bq/m³ deve estar em estado de atenção, 400 a 600Bq/m³ deve ser remediado e valores acima de 600Bq/m³ deve haver intervenção (ICRP, 1993). A ICRP (2014) mudou os critérios e determinou o limite de 300Bq/m³ que se equipara a 1–20 mSv por ano. Já a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) recomenda que ações a fim de reduzir a concentração de ^{222}Rn em ambientes monitorados devem ser feitos quando são identificados valores iguais ou superiores a 148Bq/m³ que equivale 4pCi (EPA, 2001).

Figura 7 - Lugares em que o ^{222}Rn pode adentrar em uma residência.



Fonte: Adaptado de Homeport Inspections Inc. (2021).

A CNEN, no Brasil, em seu documento recomenda que haja intervenção e ações onde a exposição do público seja crônica. As exposições crônicas também são relacionadas aos materiais de construção que em sua constituição apresenta altos teores de radionuclídeos oriundos das séries de tório ou urânio. A CNEN (2005) estima que doses superiores a 10mSv por ano precisam ser analisadas para que medidas de proteção sejam feitas. Já em exposições acima de 50mSv por ano deve haver intervenção, independentemente da justificativa.

A tabela 4, mostra a média mundial das concentrações de radônio em ambientes internos em alguns países.

Tabela 4 - Média mundial de concentrações de radônio em ambientes internos

Concentração de ^{222}Rn (Bq/m³)			
Países	**Média Aritmética**	**Média Geométrica**	**Desvio Padrão Geométrico**
Alemanha	49	37	2
Austrália	11	8	2,1
Áustria	99	15	-
Bélgica	48	38	2
Canadá	28	11	3,9
Coréia	53	43	1,8
Dinamarca	59	39	2,2
Eslováquia	87	-	-
Espanha	90	46	2,9
Estados Unidos	46	25	3,1
Finlândia	120	84	2,1
França	89	53	2
Grécia	55	44	2,4
Holanda	23	18	1,6
Hungria	82	62	2,1
Irlanda	89	57	2,4
Islândia	10	-	-
Itália	70	52	2,1
Japão	16	13	1,8
Luxemburgo	110	70	2
México	140	90	-
Nova Zelândia	22	20	-
Noruega	89	40	-
Polônia	49	31	2,3
República Tcheca	140	44	2,1
Suécia	108	56	-
Suíça	78	51	1,8
Média Mundial	39		

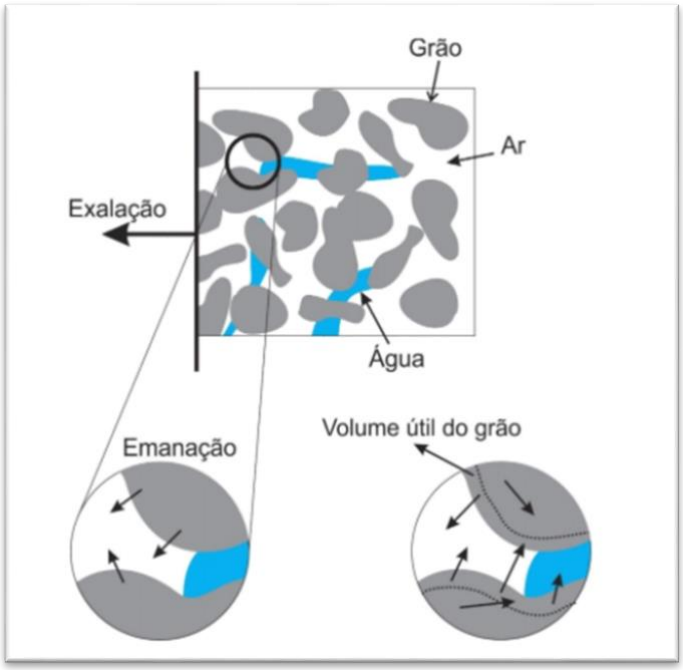
Fonte: Adaptado de WHO (2009).

2.8 Radônio Em Solos E Rochas

Os radionuclídeos presentes no solo estão ligados à radioatividade natural nos vários ambientes do planeta Terra. Entre os radionuclídeos os que se ressaltam são o ^{238}U e o ^{232}Th, que estão no topo das séries radioativas naturais. Estes nuclídeos, em geral, estão presentes na água e solo, com os produtos de seus decaimentos (UNSCEAR, 2008).

O coeficiente de emanação é o fenômeno que ocorre quando frações de átomos de radônio são liberadas através do processo de decaimento do rádio nos poros do solo e das rochas. As ações que influenciam o coeficiente de emanação estão associados ao tamanho do grão, que define a quantidade suficiente de rádio que fica próximo à superfície que exala radônio por meio dos poros, conforme a figura 8.

Figura 8 - Processo de emanação e exalação



Fonte: Perna (2015).

O processo de emanação de radônio é inversamente proporcional ao tamanho do grão. Além disso, está relacionada também à densidade dos grãos, à porosidade e o coeficiente de partição entre o ar e a água o que torna a ser a causa entre as concentrações de radônio na água e no ar. De modo geral, altas taxas de concentrações de rádio estão relacionadas à granitos, as médias concentrações estão relacionadas às rochas sedimentares e metamórficas, já as baixas taxas de concentrações estão relacionadas ao basalto e às rochas calcárias (UNSCEAR, 2000).

A permeabilidade do solo, os poros do solo e as fissuras das rochas estão relacionados a concentrações de radônio em ambientes que estão ao seu redor (EISENBUD e GESELL, 1997). Os solos que apresentam tamanhos de grãos maiores, como os cascalhos e areias grossas, possuem alta permeabilidade e exalam mais radônio do que se espera, baseado no índice de concentração de rádio. Já os solos constituídos por siltes e argilas têm como

tendência apresentar baixa permeabilidade, principalmente quando estão úmidas (RAHMAN *et al.,* 2007).

Há grande relevância nas concentrações de ^{222}Rn vindas do solo, já que estas concentrações estão associados à contribuição em ambientes internos (*indoor*). Mais de 60% de radônio mensurado em ambientes internos são oriundos do solo da fundação e do solo que estão ao redor (RAHMAN *et al*., 2007).

Pesquisas indicam que a taxa de concentração de radônio advindas do solo podem se alterar em uma faixa bem relevante. Esses valores podem ser encontrados em literatura variando entre 1,6 a 120kBq/m³ segundo Neznal *et al.,* (1997) que também compara em seus trabalhos resultados que variam entre 39,9 a 61,6kBq/m³.

A formação geológica local é determinante para as concentrações de radionuclídeos como urânio, tório e rádio presentes nas rochas (ASTM, 1994). O radônio, por ser um gás, tem sua concentração relacionada também a características físicas do solo. Em geral, as rochas possuem maiores concentrações de radônio nas fraturas e poros. As rochas que possuem maior concentração de radônio são: algumas rochas calcárias, granitos, xistos marinhos, rochas fosfáticas, gnaisses e dolomitas recristalizadas (EISENBUD E GESELL, 1977).

Nas rochas, o radônio é liberado através de processos específicos de emanação e exalação, e transportado por processos de difusão, convecção dentro e fora da rocha. A emanação ocorre quando o gás sai das partículas sólidas do material em direção dos poros preenchidos por água ou ar. Em seguida ocorre a exalação, definido como o transporte do gás existente nos poros dos materiais para o ambiente. Esse fluxo de radônio para o ambiente é denominado como taxa de exalação e é a grandeza que caracteriza a contribuição da rocha em relação às concentrações de atividade de radônio na atmosfera (SOUZA, 2009; FIOR, 2008; UNSCEAR, 2000).

As condições meteorológicas também podem alterar a emanação e principalmente a exalação de radônio de um material. Os processos de emanação e exalação de radônio no granito, por exemplo, podem aumentar em 10% quando essas rochas sofrem mudanças de temperatura de -20°C a 22°C, segundo experimentos realizados (ASTM, 1994).

A permeabilidade das rochas é uma das características mais importantes para caracterização de materiais porosos. Sendo assim, a permeabilidade depende da mobilidade do fluido, da porosidade da rocha, dentre outros fatores. A porosidade da rocha é uma característica que no meio ambiente pode ser considerada constante. Mas em situações particulares sofre mudanças. Pode aumentar ligeiramente quando os materiais são submetidos

a variação de temperaturas de 105°C a 500°C, alterações significativas em temperaturas entre 300°C e 500°C, e grandes alterações ocorre quando são submetidos a temperaturas superiores a 500°C (TAKARLI e PRINCE- AGBODJAN, 2008).

Para melhor compreensão sobre a variação das taxas de exalação de radônio em rochas, é imprescindível entender as relações entre a temperatura, a porosidade e a permeabilidade. E essas relações devem ser consideradas quando há análise de medidas de concentração em ambientes internos. Existe uma relação entre águas subterrâneas com altas concentrações de radônio e à concentrações de urânio e rádio contido em rochas graníticas. Em estudos feitos nas Cordilheiras Apalaches da América do Norte (ASTM, 1994), esta relação fica evidenciada.

2.8.1 Caracteristicas dos Solos do Município De Carambeí

O município de Carambeí, está localizado na região centro-leste do Estado do Paraná, possuindo 649,680 km² de extensão (IBGE, 2020). Situado no Primeiro Planalto Paranaense, e parte no Segundo Planalto, a composição rochosa dessa área é predominantemente granítica porfiríticas com grande expressão geográfica, referente ao Proterozóico/ Paleozóico e rochas do Grupo Açungui do Proterozóico Superior.

O granito é um termo vasto por incluir rochas distintas, não somente em sua composição mineralógica, mas também se diferem em textura e estrutura (FUCK *et al.*, 1967).

O município é predominado por seguimentos de baixas colinas, suavizadas, com largas planícies aluviais apresentando relevo plano ou quase plano. Os solos que apresentam maior expressão geográfica incluem nas classes Cabissolos 38,80%, Latossolos 36,70%, Argissolos 14,61%, Organossolos 5,69% e Neossolos 3,90% (EMBRAPA, 2002).

A figura 9 mostra os aspectos regionais rurais do município.

Figura 9 - Ilustração de área rural do município de Carambeí

Fonte: Autoria própria (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados e procedimentos na coleta e análise dos dados para alcance do objetivo do estudo.

A pesquisa foi realizada em residências na cidade de Carambeí, no estado do Paraná, especialmente na área rural. Foram feitas visitas à cidade, onde a primeira serviu para reconhecimento do local, abordagem dos moradores dos locais potenciais para a pesquisa, explanação sobre os propósitos gerais do trabalho aos moradores das propriedades da área de interesse e autorização prévia dos mesmos. Essa fase contou com o apoio de agentes da vigilância sanitária da cidade de Carambeí, principalmente por conta da experiência dos mesmos no trato com a população.

Os pontos de interesse para coleta de amostras de água, rochas e também medições *in loco* do solo tiveram foco em propriedades que possuem poços e que eventualmente usem a água. As análises de relações entre estas medições, podem ser observadas na figura 10.

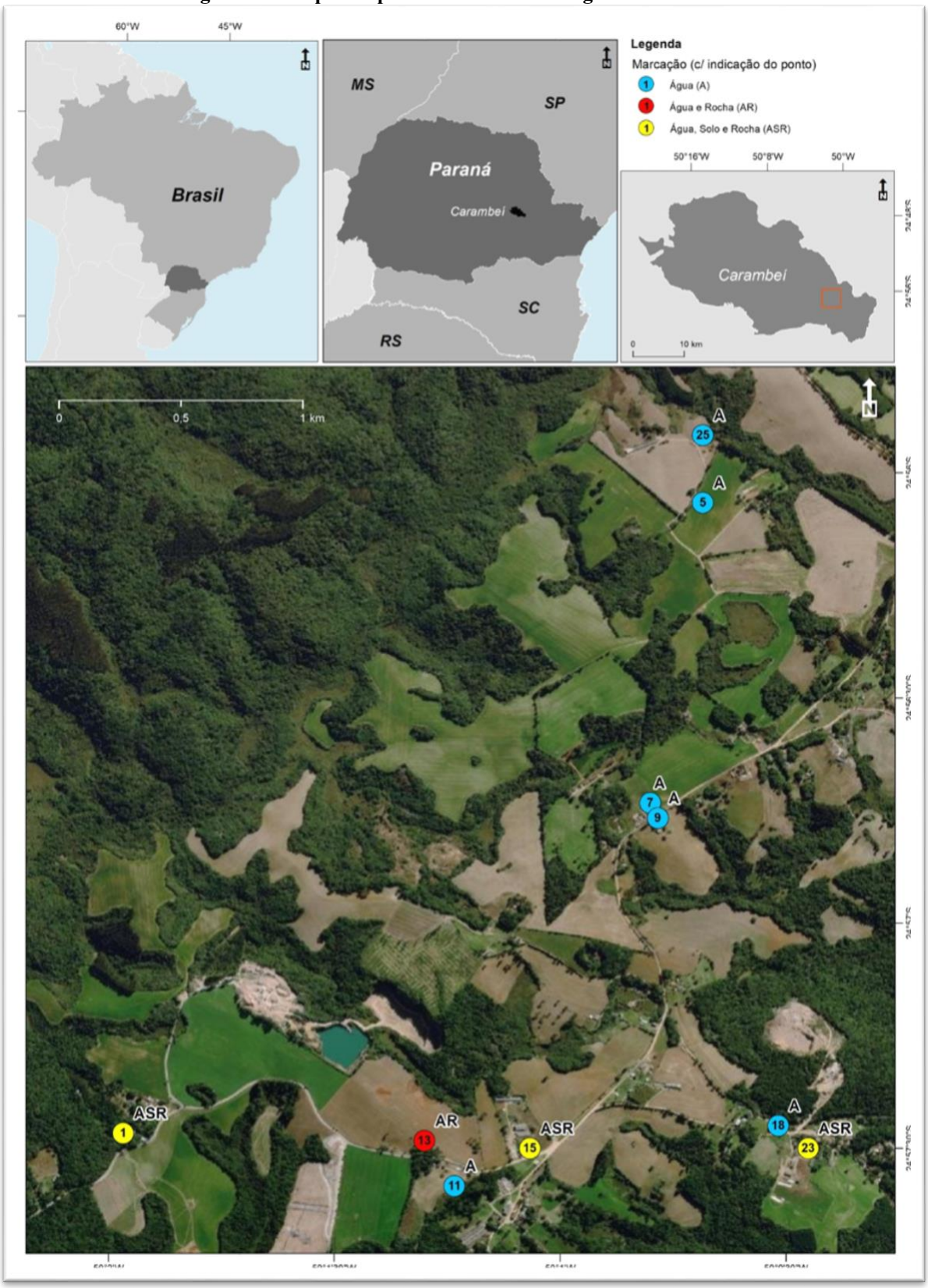
Em visitas subsequentes foram realizadas coletas de amostras de água de poços dos locais e também de rochas encontradas ao redor das residências nos locais previstos para a medição.

Nessas visitas também foram feitas medições de exalação de radônio do solo dos locais. As amostras de água e rochas coletadas foram analisadas no Laboratório de Pesquisa de Física Nuclear Aplicada, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), feitas no período de julho de 2019 a fevereiro de 2021. Nesse período também foram feitas as análises sobre as medidas de exalação do solo no local da coleta.

Ressalta-se que operação incluiu medições de radônio indoor em trabalho paralelo a este.

As análises foram feitas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, localizado na cidade de Curitiba, que possui estrutura própria para medições de radônio.

Figura 10 - Mapa dos pontos escolhidos na região de Carambeí



Fonte: Autoria Própria (2021).

O detalhamento dos materiais e métodos de medições serão descritos a seguir.

3.1 Medidas de Radônio

As medidas de radônio, foram realizadas com o monitor AlphaGUARD (Saphymo, atual *Bertin Technologies* SAS). Além de realizar medidas de radônio, o equipamento possibilita também a medida de umidade, pressão do ar e temperatura, simultaneamente.

O fácil manuseio e sensibilidade são as maiores vantagens do equipamento AlphaGUARD. Essas características possibilitam medidas de ^{222}Rn na água, solo, ar e rochas, possui resposta rápida da concentração.

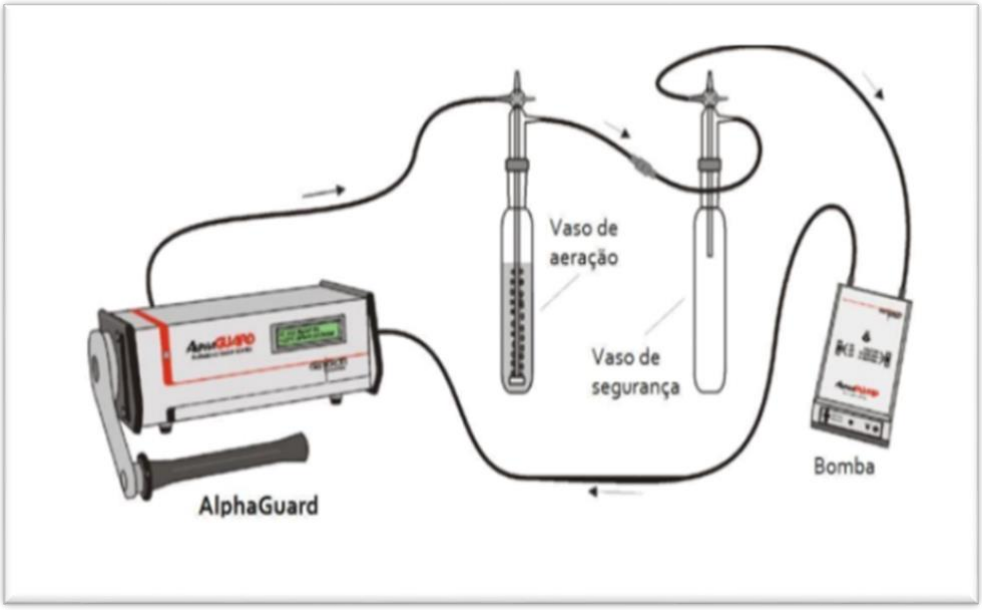
As medições de concentração de atividade dos isótopos de radônio, em geral, são feitas através da identificação de partículas alfa proveniente dos decaimentos característicos do elemento. As emissões alfa são mensuradas pelos detectores do equipamento, através da energia das partículas nos processos de ionização que ocorrem na atmosfera captada pelo mesmo.

O equipamento dispõe de câmara de ionização que mede contrações de $2Bq/m^3$ a $20x10^5Bq/m^3$, que no seu interior é preenchida com o ar captado, além de ter evidentemente, um catodo e um anodo que produzem campo elétrico. Durante a ionização do gás, os elétrons se direcionam para o anodo e os íons para o catodo em um sinal proporcional às ionizações, formando par de elétrons-íon. A câmara de ionização utilizada pulsação para detectar partículas alfa.

O equipamento trabalha no modo pulsado, mas também possui o modo de difusão, onde as partículas de gás passam por um filtro de fibra de vidro para a câmara de ionização. As medidas das amostras de água foram efetuadas por meio do AlphaGUARD com o AquaKIT, equipamento específico para esse tipo de medição.

Ao medir radônio em água, o equipamento mede a concentração no ar desprendido da amostra de água. O AquaKIT é formado por um vaso de aeração que contém a amostra, vaso de segurança para assegurar que a água do vaso que contém a amostra não extravase, conectados por mangueiras, formando um circuito fechado, conforme a figura 11.

Figura 11 - Arranjo AquaKIT



Fonte: Martin (2019).

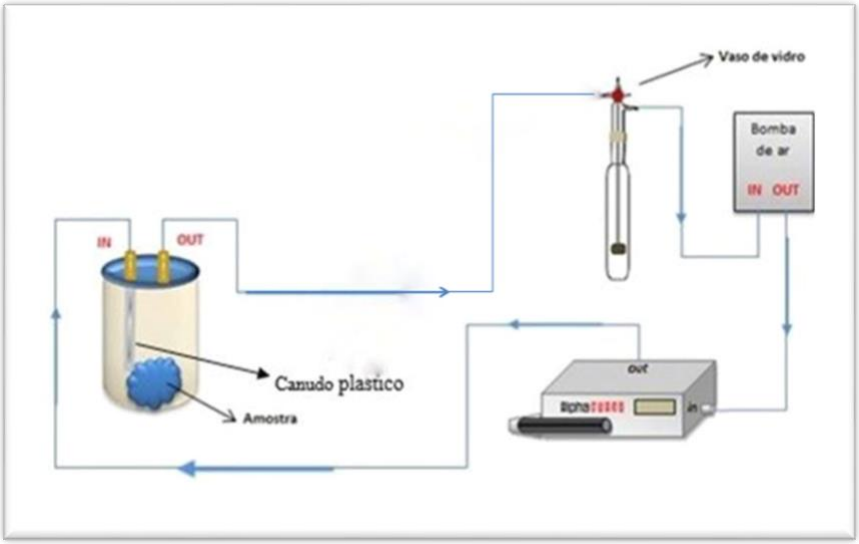
O mesmo equipamento foi utilizado na medição de solo. Porém, para esse tipo de medição é preciso conectar uma sonda, que tem de a ser inserida aproximadamente a 1 metro de profundidade no solo, fazendo com que o ar que vem do solo, passe por todo o equipamento e volte para a atmosfera, formando um sistema aberto, conforme figura 12.

Figura 12 - Arranjo utilizado para medidas de solo

Fonte: Martin (2019).

O equipamento também serve para realizar medidas de concentrações de radônio em rochas. Entretanto, o arranjo é modificado conforme a figura 13. Utiliza-se um vaso de vidro de segurança que impede que partículas de poeira e/ou fragmentos da amostra entrem no interior o AlphaGUARD. A canopla plástica acoplada no interior do frasco de medida serve para direcionar o ar proveniente da bomba ligada para a parte mais baixa do frasco. Do mesmo modo, o ar do interior do frasco com radônio é direcionado em direção a câmara do AlphaGUARD.

Figura 13 - Arranjo utilizado para medidas de rochas



Fonte: Adaptado de Del Claro (2016).

3.1.1 Medidas de radônio em águas

Por conta da permeabilidade do solo, há a exalação do radônio para as águas de poços. O radônio contido na amostra após coletada tem duas origens. O denominado não suportado, ou seja, foi gerado no entorno do poço e o suportado, o filho do rádio contido na água, é gerado continuamente, pois a meia-vida do rádio é de 1620 anos. Para a realizar a coleta das amostras de água de poço é necessário utilizar o protocolo para manter o radônio na amostra. Durante o intervalo de tempo entre as medições, este cuidado também é tomado, não deixando ar nos frascos.

Os poços onde foram obtidas as amostras contêm bomba para o transporte de água até a superfície. Foram coletadas águas de onze poços. Observa-se que todos os poços analisados são utilizados pelos moradores para obter água de consumo.

As amostras foram coletadas em frascos plásticos, higienizados e identificadas com letras P acompanhadas com dos números de 1 a 11. No momento da coleta, houve um cuidado

o para que as amostras não fossem agitadas, com o mesmo intuito de não retirar o ar contido na água antes das medições. Os frascos foram vedados com o mesmo intuito, conforme a figura 14.

Figura 14 - Águas após a coleta

Fonte: Autoria Própria (2021).

Após a coleta, houve um intervalo entre as medidas, conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Intervalo entre as medidas

Intervalo entre as medidas	
Medida 1	Um dia após a coleta (momento zero)
Medida 2	5° dia
Medida 3	10° dia
Medida 4	15° dia
Medida 5	20° dia
Medida 6	30° dia a partir do momento zero

Fonte: Autoria Própria (2021).

As amostras de água foram medidas nos intervalos mencionados na tabela 5, de modo a gerar pontos para o ajuste de curva representada das concentrações no tempo. A última medida, realizada após 30 dias indica o equilíbrio secular, ou seja, quando a atividade do radônio é a mesma que o seu antecessor, elemento rádio.

O equipamento foi ajustado como mostra o arranjo da figura 15, configurado em 1minuto *flow,* ou seja, o equipamento faz a captação de dados a cada 1 minuto. O fluxo da bomba que faz com que o ar circule pela amostra e equipamento, foi ajustada de 1L/min, conforme o protocolo estabelecido para esse tipo de medição.

Figura 15 - Arranjo utilizado para medição de radônio em água

Fonte: Autoria Própria (2021).

Após a medição feita pelo AlphaGUARD, a metodologia contida no manual do equipamento, fornece cálculos que resultam no valor da concentração, em conjunto com ajustes estabelecidos em trabalhos de intercomparação feitos junto a CNEN/CDTN.

3.1.2 Cálculo da concentração de radônio em água

O cálculo da concentração de radônio em água considera o volume do sistema, volume da amostra, variando conforme o protocolo utilizado e a quantidade de mangueiras conectadas no sistema, a temperatura em °C e a pressão atmosférica, medidas automaticamente pelo equipamento. A equação 2 é utilizada para essa concentração, através do protocolo estabelecido.

$$C_{água} = \frac{C_{ar}\left(\frac{V_{sistema} - V_{amostra}}{V_{amostra}} + K\right) - C_{bg}}{1000} \qquad \text{Eq. 2}$$

Em que: $C_{água}$ é a concentração de radônio em Bq/L, C_{ar} a concentração de radônio no ar do sistema em Bq/m³, $V_{sistema}$ o volume do sistema em mL, $V_{amostra}$ o volume da amostra em mL, K o coeficiente de partição, considera a temperatura T em graus Celsius (°C) no momento da medida, calculado por meio da equação 3, C_{bg} (*background*) a concentração de radônio presente no sistema antes da medição em Bq/m³.

$$K = 0{,}105 + 0{,}405.\, e^{-0{,}502.T(°C)} \qquad \text{Eq. 3}$$

3.1.2.1 Curva de decaimento do ^{222}Rn e do ^{226}Ra

Para representar a concentração da atividade das amostras de água mensuradas nesta dissertação, deve ser considerado o momento inicial da concentração de radônio vindo do solo e do rádio presente na amostra que passa pelo processo de decaimento.

A equação 4 exibe a concentração de radônio em função a concentração inicial de radônio e rádio.

$$A_{Rn}(t) = A_{oRa}\left(1 - e^{-\lambda Rn\, t}\right) + A_{oRn}\left(e^{-\lambda Rn\, t}\right) \qquad \text{Eq. 4}$$

Onde há $A_{Rn}(t)$ a concentração é a média do tempo de radônio no tempo (t), A_{oRa} é a concentração inicial que é constante de rádio na amostra, A_{oRn} é a concentração inicial de radônio na amostra e λ_{Rn} é a constante de decaimento do radônio.

Analisando a amostra nota-se que a primeira parte da equação se refere ao radônio gerado pelo decaimento de rádio na amostra, e a segunda parte se refere ao radônio contido na amostra devido o processo de difusão do gás presente no solo para a água.

Após a equação 4 ser apresentada, foram feitos cálculos com auxílio do programa ORIGIN 2019b, a partir das concentrações de radônio e rádio (A_{oRn} e A_{oRa}) e a partir da concentração de radônio A_{oRn} (t) nos intervalos do tempo contido na tabela 5.

Salienta-se que os valores da concentração da atividade de radônio A_{oRn} (t) plotadas na curva companharam os seus erros. Na construção da curva de decaimento obtiveram-se os valores iniciais de A_{oRn} e A_{oRa} e seus erros. Esses erros calculados são menores que os erros obtidos em cada medida isolada, como esperado ao realizar o ajuste da curva.

3.1.3 Medidas de Radônio em Rochas

Para realizar as medidas da concentração de radônio em rochas, as amostras foram lacradas individualmente em um frasco de vidro completamente vedado por cerca de 40 dias para atingir o equilíbrio secular entre o ^{226}Ra e ^{222}Rn, conforme figura 16.

Figura 16 - Amostras de rochas fechadas em frascos de vidro

Fonte: Autoria Própria (2021).

Para que não haja deposição de poeira ou fragmentos vindo das amostras na câmara do AlphaGUARD, é necessário adicionar um vidro de segurança, pois essa deposição de poeiras e fragmentos emitirão partículas continuamente no interior do equipamento influenciando nas concentrações de radônio, acrescentando valores durante o tempo de medida.

As amostras de rochas foram medidas em sistema fechado, conforme figura 17 onde o equipamento AlphaGUARD foi conectado ao frasco contendo as amostras através de mangueiras *tygon*, que não permitem trocas gasosas entre o gás interno do circuito com o ar externo. Usaram-se também conectores de três vias que servem para abrir ou interromper a passagem do fluxo de ar entre o sistema e o frasco de vidro.

Para a realização das medidas foi acoplada uma bomba de ar (AlphaPUMP) no circuito fechado. Neste protocolo, durante as medidas, a bomba permaneceu ligada permitindo que o ar do circuito fosse homogenizado.

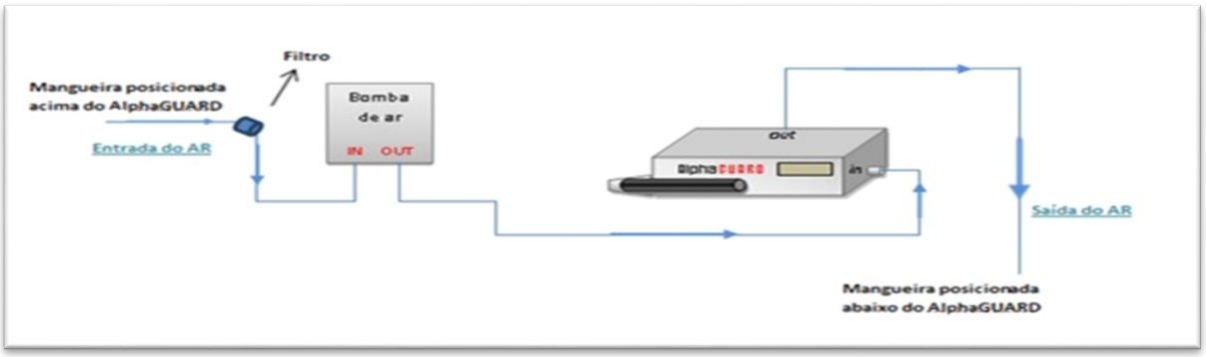
Figura 17 - Arranjo utilizado para medidas de radônio em rochas

Fonte: Autoria Própria (2021).

Para as medidas das concentrações de radônio, o AlphaGUARD foi configurado para trabalhar em 10min/*flow*, ou seja, o equipamento faz a captação de dados a cada 10 minutos. A bomba foi configurada para trabalhar com o fluxo de 0,5L/min e o tempo de medida foi de 24 horas por amostra.

Nos intervalos entre uma medida e outra foi realizado a ventilação do sistema em circuito aberto, conforme figura 18, para que os valores de referência do sistema sejam reduzidos e normalizados, de modo a não alterar os resultados das próximas medidas.

Figura 18 - Desenho esquemático do sistema aberto utilizado para ventilação



Fonte: Del Claro (2013).

As amostras de rochas foram identificadas através do volume e da sua área superficial. Para o cálculo da área superficial, as faces das rochas foram desenhadas em papel quadriculado em que cada quadrado mede 1cm. Esse desenho foi fotografado e exportado para o *software* MATLAB® que comparou a quantidade de pixels do quadrado do desenho

com a quantidade de pixels das superfícies das rochas, dado em cm² e transformado em m². E o volume foi calculado através da observação do nível de deslocamento da água após a imersão da amostra em Becker graduado em milímetro.

3.1.4 Concentração de Radônio em Rocha

O equipamento AlphaGUARD permite obter a concentração de radônio proveniente das rochas graníticas em proporção de Bq/m³.

A fim de descobrir a contribuição dessas concentrações de radônio em rochas para o ambiente, utiliza-se o resultado da concentração calculado mensurada pelo equipamento inserindo para o cômodo padrão com dimensões (5m x 4m x 2,8m) sugerido pela UNSCEAR (2000).

A equação 5 corresponde a contribuição de radônio para o cômodo padrão.

$$C_e = C_s \times \frac{A}{V} \ \left(\frac{Bq}{m^3}\right) \qquad \text{Eq. 5}$$

Onde C_e é a contribuição para a concentração de radônio que efetivamente acontece no cômodo padrão, C_s é a concentração medida no sistema AlphaGUARD, e A/V é um fator adimensional que corrige, pela relação área/volume, a concentração medida no sistema para a contribuição efetiva em um cômodo padrão.

3.1.5 Medidas de Radônio em Solo

As medidas de radônio foram feitas com o equipamento AlphaGuard, utilizando o arranjo exemplificado na figura 19, onde os números em branco indicam: (1) equipamento AlphaGUARD; (2) bomba, (3) rotâmetro, (4) sonda inserida a 95cm de profundidade no solo, pois para medidas de radônio em solo deve ser utilizada uma sonda que colete dados do solo abaixo da superfície.

Figura 19 - Arranjo para medida de solo

Fonte: Autoria Própria (2021).

As medidas de solo contemplaram três locais dos quais foram coletadas as rochas, e que também ficassem em torno dos poços onde foram coletadas amostras de águas. Para realizar a medição é necessário que o solo não tenha sido modificado, ou seja, que esteja naturalmente intacto. Este fator também influenciou na decisão dos locais.

Antes de realizar as medições, foram feitas verificações do *background* do equipamento, em sistema fechado durante 10 minutos. Após a locação, o procedimento foi realizado através da inserção da sonda no solo, através de golpes manuais, na profundidade de 1m. Logo em seguida, a sonda foi levantada por 5cm, possibilitando assim, um volume vazio para que haver sucção de ar do subsolo.

Diferentemente da medição de radônio em águas, a medição de radônio em solo é feita através de sistema aberto, conforme o arranjo da figura 19, com o AlphaGuard configurado para realizar a medição em 1min/*flow* com um rotâmetro, o que é uma etapa importante para verificar se o fluxo de ar obtido no momento é suficiente. Caso o fluxo de ar seja baixo, o ponto deve ser descartado e outro ponto que ofereça melhores condições deve ser pesquisado. Para cada medida de solo efetiva, em geral, há muitos arranjos descartados.

O monitor AlphaGUARD faz medições de radônio em solo em proporção de centenas kBq/m³, com limite de 20 x 10^5Bq/m³ (valor alto). Após a utilização do equipamento em solo, em geral, apresenta altos valores, imediatamente deve ser feita uma ventilação até que o *backgroud* regresse aos valores referência. Evidenciando que o tempo dessa intervenção pode ser de apenas algumas horas ou até de vários dias. Esse procedimento é feito com o

propósito do alto risco de contaminação do equipamento pelos filhos de meia-vida curta que se adere nas paredes das câmaras de ionização.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos através da medição de radônio em águas de poço, rochas e solo.

4.1 Medidas de Água de Poço

Foram realizadas medidas de onze poços de diferentes residências, nomeadas com código P1 a P11, como mencionado no tópico 3.1.1. Os resultados obtidos para a concentração de radônio em Bq/L.

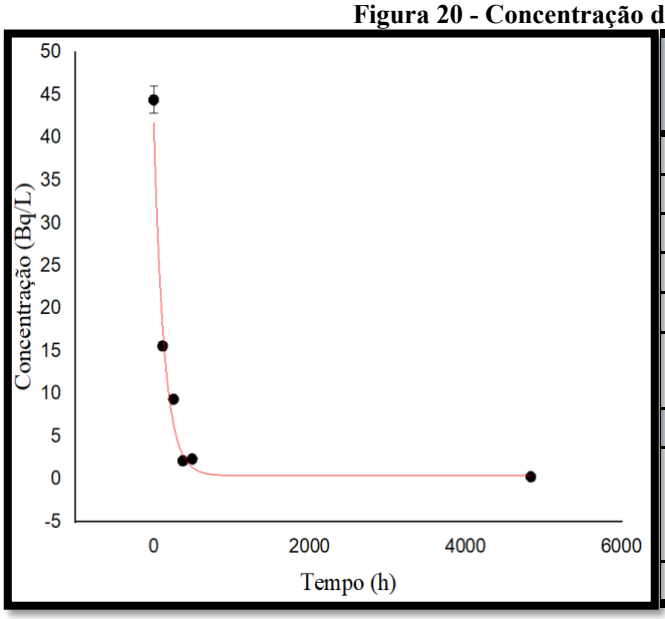
As concentrações de ^{222}Rn e ^{226}Ra foram calculas a partir das proporções das medidas iniciais realizadas da concentração de ^{222}Rn no tempo, conforme a explicação a seguir.

As medidas ^{222}Rn ocorreram em intervalos de tempos conforme consta na tabela 5. O radônio medido em águas pode ser encontrado de duas maneiras: o ^{222}Rn proveniente do solo para água (não suportado) e do ^{226}Ra contido na amostra (suportado).

A partir dos resultados de concentrações obtidos na medição não é possível separar a contribuição do radônio suportado e do não suportado. Esta identificação ocorre após o procedimento de ajuste de curva descrito no item 3.1.2.1 e, a partir de suas características de decaimento no tempo, por meio da equação 4, obtém as concentrações do ^{222}Rn e do ^{226}Ra.

A figura 20 mostra os resultados das concentrações de radônio nas amostras das águas de poços coletadas. Do lado direito, exibe o resultado das concentrações obtidas no equipamento AlphaGUARD. Do lado esquerdo, exibe o gráfico da curva de decaimento dos radionuclídeos radônio e rádio e todos os gráficos das concentrações de águas de poços foram construídos e se encontram no Apêndice A.

Figura 20 - Concentração de ^{226}Ra e ^{222}Rn do poço 1



Poço 1	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	44,5	1,6
Medição 2	115	15,6	0,4
Medição 3	234	9,4	0,3
Medição 4	352	2,2	0,2
Medição 5	472	2,4	0,2
Equilíbrio Secular	4344	0,29	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,4	0,3	**40,9**	4,4

A tabela 6 mostra um resumo dos resultados das concentrações de radônio em águas dos poços. A metodologia empregada permitiu também a obtenção do resultado das concentrações de rádio, sendo que a curva de decaimento foi construída a partir desses dois radionuclídeos.

Tabela 6- Resulltado das concentrações de ^{226}Ra e de ^{222}Rn nos poços

Poços	Concentração de ^{226}Ra (Bq/L)	Erro de ^{226}Ra (Bq/L)	Concentração de ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
P1	0,4	0,3	40,9	4,4
P2	0,6	0,7	87	13
P3	1,4	2,5	0,4	1,2
P4	1,0	0,9	25,3	9,8
P5	0,8	0,7	8,8	4,3
P6	3,8	2,3	0,4	0,8
P7	0,4	0,3	36,5	5,7
P8	0,3	0,2	42,8	4,9
P9	0,6	0,5	25,4	5,8
P10	0,6	0,5	17,3	6,0
P11	0,3	0,3	77,2	7,7

A tabela 6 apresenta os resultados encontrados de ^{226}Ra e ^{222}Rn, separadamente, nas amostras de águas e os dados evidenciam que cerca de 64% das concentrações de ^{226}Ra nas amostras investigadas estão acima de 0,5Bq/L e cerca de 81% das concentrações de ^{222}Rn também estão acima de 0,5Bq/L que é o valor limite de emissão de atividade alfa estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2017).

A EPA (2000) diz que o radônio apresente na água contribui somente 1/10.000 do seu valor para a atmosfera. Sendo assim, os valores das concentrações das águas de poços encontradas só podem ser alto risco à saúde se este for investigado no contexto do uso da água. Em algumas situações são necessárias ações mitigatórias em relação ao radônio.

4.2 Medidas de Rochas

Foram realizadas coletas de amostras de rochas graníticas no entorno das residências de Carambeí, foco desta pesquisa. As amostras foram nomeadas com códigos correlatos aos utilizados para amostra das águas e solos. Com isso, para as rochas analisadas, as amostras R1, R2, R7 e R9 correspondem ao entorno dos respectivos locais aos poços P1, P7 e P9.

Para realizar os cálculos do fluxo de exalação das amostras de rochas graníticas foram feitas medidas de volume e área superficial, conforme descrito no item 3.1.3.1. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 21 a 24.

Figura 21 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R1

Amostra	Volume (m^3)	Área (m^2)
R1	0,000358	0,0361
	Concentração (Bq/m^3)	**Erro (Bq/m^3)**
	1.141	26

Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 22 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R2

Amostra	Volume (m^3)	Área (m^2)
R2	0,000388	0,0392
	Concentração (Bq/m^3)	**Erro (Bq/m^3)**
	53,7	1,6

Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 23 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R7

Amostra	Volume (m^3)	Área (m^2)
R7	0,000522	0,0524
	Concentração (Bq/m^3)	**Erro (Bq/m^3)**
	65,8	7,0

Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 24 - Concentração de ^{222}Rn em amostra de rocha R9

Amostra	Volume (m³)	Área (m²)
R9	0,000412	0,0413
	Concentração (Bq/m³)	**Erro (Bq/m³)**
	75,1	1,7

Fonte: Autoria Própria (2021).

A tabela 7 mostra um resumo dos resultados do fluxo de exalação das concentrações de radônio de rochas graníticas.

Tabela 7 - Resultados de concentração de ^{222}Rn em rochas graníticas

Amostras	Volume (m³)	Área (m²)	Concentração (Bq/m³)	Erro (Bq/m³)
R1	0,000358	0,0361	1141	26
R2	0,000388	0,0392	53,7	1,6
R7	0,000522	0,0524	65,8	7,0
R9	0,000412	0,0413	75,1	1,7

Através da tabela 7, observa-se que em apenas uma amostra de rocha granítica medida a contribuição na concentração apresenta valor muito superiores à 200Bq/m³. Esse valor pode ser considerado preocupante, já que os valores limites referentes da UNSCEAR é de 200Bq/m³ e da ICRP é de 300Bq/m³.

Todavia, após realizar o cálculo dessas concentrações das rochas, foram realizados cálculos da contribuição efetiva na concentração simulando que as rochas estão inseridas em um cômodo padrão com medidas (5m x 4m x 2,8m), como pisos ou paredes. Foram consideradas três situações. A primeira situação simula que o cômodo seja totalmente recoberto por rochas graníticas. A segunda situação, que o cômodo esteja recoberto somente nas paredes e no piso e a terceira situação que somente o piso do cômodo esteja recoberto por rochas graníticas, conforme tabela 8.

Tabela 8 - Comparação da concentração de ^{222}Rn no cômodo padrão em diferentes situações

Rochas	Contribuição de ^{222}Rn em todo Cômodo Padrão (Bq/m³)	Contribuição de ^{222}Rn nas paredes e no piso do Cômodo Padrão (Bq/m³)	Contribuição de ^{222}Rn no piso do Cômodo Padrão (Bq/m³)
R1	174,1 ± 3,8	135,6 ± 3,0	38,5 ± 0,8
R2	7,5 ± 0,2	5,9 ± 0,2	1,65 ± 0,05
R7	6,6 ± 0,7	5,1 ± 0,5	1,5 ± 0,2
R9	9,8 ± 0,2	7,7 ± 0,2	2,18 ± 0,05

4.3 Medidas de Solos

As medidas de radônio em solos foram realizadas ao redor dos locais onde se investigou águas de poços, principalmente os lugares onde foram coletadas as amostras de rochas. As amostras foram nomeadas com códigos correlatos aos utilizados para amostra das águas. Com isso, para os três solos locais, as amostras S1, S7 e S9 correspondem ao entorno dos poços P1, P7 e P9. Os valores das concentrações de radônio encontrados nas medidas de solo para estes locais podem ser observados na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados das medidas das concentrações de ^{222}Rn e ^{220}Rn em solo

Amostras	^{222}Rn (kBq/m³)	Erro	^{220}Rn (kBq/m³)	Erro
S1	18,4	4,1	188,4	0,9
S7	208	21	27	8
S9	126,5	6,8	33,8	7,0

Os resultados das medições dos gases ^{222}Rn e ^{220}Rn no solo apresentam uma considerável variação nos valores de concentração, na faixa de 18,4±4,1 kBq/m³ a 208±21kBq/m³ e 27±8kBq/m³ a 188,4±0,9kBq/m³, para cada isótopo, respectivamente.

Observa-se que todos os resultados são muito acima dos 300Bq/m³ estabelecidos para ambientes internos. Todavia, obviamente a dinâmica de transporte de gases do solo para ambientes não é simples e o radônio gerado no solo se desprende para a atmosfera em geral. A contribuição para ambientes internos depende das condições de contorno.

O solo S1 apresenta maior concentração de ^{220}Rn do que ^{222}Rn. Isto significa que, devido à meia-vida mais curta do ^{220}Rn, a contribuição para a radioatividade desse solo para ambientes internos é menor.

Os solos S7 e S9 apresentam menor concentração de ^{220}Rn do que ^{222}Rn. Isto significa que, devido à meia-vida mais curta do ^{220}Rn, a contribuição para a radioatividade para ambientes internos é maior.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho permitiu a avaliação de radiação natural em pontos de interesse, por meio de coletas de água de poços e rochas e também medições *in loco* de solos na região de Carambeí. Os resultados das concentrações de ^{226}Ra encontrados nas amostras de águas de poços ficaram na faixa de 0,3±0,3Bq/L a 3,8±2,3Bq/L, as quais cerca de 64% dessas amostras estão acima do valor 0,5Bq/L, que é o limite para emissão alfa. Nas mesmas amostras, foram encontradas concentrações de ^{222}Rn que variaram de 0,4±0,8Bq/L a 87±13Bq/L sendo que cerca de 81% das amostras apresentam valores também acima de 0,5Bq/L, limite para emissão de partículas alfa em águas, conforme estabelecido.

As medições mostram que as águas de poços da região contêm uma quantidade de ^{222}Rn expressiva. Parte dos valores encontrados teve menor contribuição do radônio suportado e a contribuição para a atmosfera interna de residências pode não ser importante, já que parte do radônio gerado difunde para a atmosfera antes que a água seja utilizada no ambiente interno de convívio humano.

No caso das concentrações de radônio suportado, gerado pelo ^{226}Ra, avalia-se que a contribuição para o interior de ambientes que façam uso dessas águas de poço pode ser um problema de saúde pública.

Os níveis de concentração de ^{222}Rn nas rochas graníticas variaram de 1141±26Bq/m³ a 53,7±1,6Bq/m³. Foram realizados cálculos das concentrações simulando que essas rochas estão inseridas em um cômodo padrão da UNSCEAR. Na primeira situação em que todo o cômodo esteja totalmente recoberto, os valores variaram de 174,1±3,8Bq/m³ a 6,6±0,7Bq/m³. Na segunda situação, onde há granito somente nas paredes e no piso, as contribuições variaram de 135,6±3,0Bq/m³ a 5,1±0,5Bq/m³. A terceira situação, em que somente o piso do cômodo esteja recoberto por rochas graníticas, a contribuição na concentração varia de 38,5±0,8Bq/m³ a 1,5±0,2Bq/m³. A concentração relativa à rocha granítica R1 está acima dos limites estabelecidos pela UNSCEAR de 200Bq/m³ e da ICRP de 300Bq/m³. No entanto, a contribuição para o cômodo padrão não atinge os valores recomendados. Mas ressalta-se que a contribuição de materiais de construção é cerca de 10 vezes menor do que a do solo.

Já os resultados de medições dos radionuclídeos ^{222}Rn e ^{220}Rn no solo apresentam uma considerável variação nos valores de concentração, na faixa de 18,4±4,1kBq/m³ a 208±21kBq/m³ e 27±8kBq/m³ a 188,4±0,9kBq/m³, para cada isótopo, respectivamente.

Os valores encontrados nesta pesquisa servem como base para o Programa Nacional de Radônio, e permitem observar que há uma questão de saúde pública, principalmente

relacionada à quantidade de rádio, e consequentemente de radônio *indoor*, em residências ou ambientes que façam uso desta água para consumo.

Sugere-se para trabalhos futuros, medições correlatas de radônio *indoor* em residências onde há uso efetivo de águas de poços onde a concentração de rádio é alta. Também sugere-se que as medições em solo sejam feitas em maior quantidade e com medidas de radiação gama que possam gerar um mapeamento da região.

REFERÊNCIAS

AFONSO, J. C. **Química nova na escola**. Volume 32, nº4. São Paulo, 2009. p. 269.

ALABDULA'ALY, A. I. Occurrence of radon in the central region groundwater of Saudi Arabian. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 44, p. 85-95, 1999.

ARAÚJO, G.S. **Estudos dos Níveis de Emanação do ^{222}Rn de Alguns Materiais de Construção Civil e Áreas Públicas**. 2003. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

ARTUR, A. C. ; BONOTTO, D. M.; AMARAL, P. G. Q.; GALEMBECK, T. M. B. Metodologia para a quantificação da exalação do gás radônio em rochas ornamentais. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 32, n.1, p. 166-180, 2013.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Radon: Prevalence, Measurements, Health Risks and Control.** ASTM, Philadelphia, 1994.

ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry- U.S. Department of Health and Human Services. Radon Toxicity. **ATDSR Publication**. 1600 Clifton Road NE Mailstop F-62. Atlanta, 2008.

AZEVEDO, L. R. P. **Emanação de radônio em rochas ornamentais e para revestimento do estado do Ceará**, Brasil. 2013. 185 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2013.

BAILEY, M.R.; ANSOBORLO, E.; GUILMETTE R. A.; PAQUET, F. Practical application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. **Radiat Prot Dosimetry**. 2003.

BAILEY, M.; ANSOBORLO, E.; ETHERINGTON, G.; GREGORATTO, D.; GUILMETTE, R.; MARSH, J.; PAQUET, F.; SMITH, J. Proposed Updating of the ICRP Human Respiratory Tract Model. In: IRPA, 2012.

BARAZZA, F.; GFELLER, W.; MURITH, C.; PALACIOS, M. The Assessment of the Radon Problem in Switzerland and the New National Radon Action Plan 2012-2020, **Federal Office of Public Health**.

BONFIM, S. A. **Radônio como indicador de contaminação no solo por NAPLs**. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares. Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Nuclear 2018.

Brasil. Ministério da Saúde. **Manual de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano**. Brasília, DF. 2006.

BRITO, A. S. **Medição de concentrações de radônio em ambientes da região metropolitana de Salvador, BA.** Dissertação de Mestrado. Salvador - Bahia, 2013.

CAMPOS, T. F. C.; PETTA, R. A.; MALANCA, A. ; PASTURA, V. F. S.; SICHEL, S. E.; MOTOKI, A. O gás radônio e a radiação natural em terrenos metagraníticos e pegmatíticos: O

caso do município de Lages Pintadas (Rio Grande do Norte, Brasil). **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 26, n; 2, p. 45-52, 2013.

CELA – Canadian Environmental Law Association. Radon in Indoor Air: A Review of Policy and Lawin Canada. 2014. Canadian Environmental Law Association.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Posição Regulatória 3.01/007 – Níveis de Intervenção e de Ação para Exposição Crônica. Rio de Janeiro, 2005.

CNEN-NN-3.01-01 "Diretrizes Básicas de Radioproteção". Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro. Setembro/2011.

COGLIANO, V. J.; BAAN, R.; STRAIF,K.; GROSSE,Y .;LAUBY-SECRETAN, B.; GHISSASSI, F.E.; BOUVARD, V.; BENBRAHIM-TALLAA, L.; GUHA, N.; FREEMAN, C.; CALICHET, L.; WILD, C.P. Preventable Exposures Associated With Human Cancers. J**ournal of theNational Cancer Institute**,v.107,n.11,p. 1-13, 2011.

COLGAN, P. A; MCGARRY, A. T. Radon Monitoring and Control of Radon Exposure, **12th International Congress of the International Radiation Protection Association**, Refresher Course 15, Buenos Aires, Argentina, 2008.

COMMISSION RECOMMENDATION of the Protection of the Public Against Exposure to Radon in Drinking Water Supplies. **Journal of the European Communities**. Document number 4589, 2001.

CORRÊA, J.N.; SILVA, A.C.M.; PASCHUK, S.A.; BARRETO, R.C.; DENYAK, V.; SCHELIN, H.R.; NARLOCH, D.C.; HASHIMOTO, Y.; MARTIN, A.C. Thickness of radon emitting layer in building materials. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 172, p. 108786, 2020.

CORRÊA, J. N. **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná**. 2011. 103 f. Tese –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

COSTA, A. B.; AZEVEDO, A. E. G,. Atividades de radônio-222 e rádio-226 em águas subterrâneas de três regiões da Bahia: Camaçari , Ipirá e Caetité/Lagoa Real (antes do processamento de urânio). **Cadernos de Geociências**. V. 9, N. 2 (2012).

DEL CLARO, F. ; PASCHUK, S. A. ; CORRÊA, J. N. ; MAZER, W. ; NARLOCH, D. C. ; MARTIN, A. C. ; DENYAK, V. . Radon exhalation from granitic rocks. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 7, p. 1-19, 2019.

DEL CLARO, F. **Avaliação da concentração de radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR.** 103 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

DEL CLARO, F. **Proposta de protocolo para medição de concentrações de radônio proveniente de rochas granpiticas em marmorarias**. 2016. 125f. Tese-Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

EISENBUD, M; GESSEL, T. Environmental Radioactivity From Natural, **Industrial and Military Sources**. 4 ed. California, USA: Academic Press, 1997.

EMBRAPA. Caracterização dos solos do Município de Carambeí - PR / Itamar A. Bognola. [*et al.,*]. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 75 p. - (**Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**; n. 8).

EPA – Environmental Protection Agency. Building Radon Out: A Step-by-Step Guide on How to Build Radon Resistant Homes. Office of Air and Radiation, 2001.

EPA - Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule. v. 65, n. 236, 2000. Washington, D.C, 2000.

EPA – US Environmental Protection Agency. Radiation Health Effects. 2006. https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects.

ESPINOSA, G.; GOLZARRI, J. I.; RICKARDS, J.; GAMMAGE, R. B.
DISTRIBUTION OF INDOOR RADON LEVELS IN MEXICO. **Radiation Measurements 31**. 1999.

EUROPEAN COMMISSION. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Buildings Materials, n 112, 1999. Directorate – General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.

FIANCO, A. C. B. **Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre-RS.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre-RS. 2011.

FIELD, R. W.; STECK, D. J.; SMITH, B. J. BRUS, C. P.; FISHER, E. L.; NEUBERGER, J. S.; PLATZ, C. E.; ROBINSON, R. A.; WOOLSON, R. F.; LYNCH, C. F. Residential Radon Gas Exposure and Lung Cancer: The Iowa Radon Lung Cancer Study, **American Journal of Epidemiology**, Volume 151, Issue 11, 1 June 2000, Pages 1091–1102,

FIOR, L. **Análise da Concentração de Radônio Proveniente dos Materiais de Construção.** 2008. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

FUCK, R. A.; MARINI, O. J.; TREIN, E. Contribuição ao estudo das rochas graníticas do Estado do Paraná. In: BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R.; PINTO, V. M. (eds.), 1967. Geologia do Pré-Devoniano e intrusivas subseqüentes da porção oriental do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 23/25, p. 183-219, 1967.

GERALDO, Luiz Paulo et al . Medidas dos níveis de radônio em diferentes tipos de ambientes internos na região da Baixada Santista, SP. **Radiol Bras**, São Paulo , v. 38, n. 4, p. 283-286, Aug. 2005.

GIULIANI, Glauber Minssen. **Registro de radônio em solos e rochas do município de Porto Alegre**, RS, como guia para a prospecção de água. Monografia. Porto Alegre. 2015.

HARRISON, J. Current and forthcoming ICRP recommendations on radon exposure. In: International Conference on Occupational Radiation Protection. 2014.

Homeport Inspections Inc. Disponível em: http://www.homeportinspections.com/new-page-1 em: 26 de maio de 2021.

HPA – Healthy Protection Agency. Limitation of Human Exposure to Radon. 2010. Healthy Protection Agency.

HULKA, J., VLCEK, J. THOMAS, J. Natural radioactivity in building materials – Czech experience and European legislation. International Symposium Las Vegas, 2008. Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists. NV, 2008.

IARC–International Agency for Research on Cancer. Lists of IARC evaluations. Complete list of all monographs and supplements published to date. May 2010.

IARC–International Agency for Research on Cancer. Non-ionizingand Ionizing Radiations: Recent Highlights Fatiha EL Ghissassi on behalf of the IARC Monograph Programme**.** 2014.

IBGE- INSTITUTO BRASILEITO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico, 2020. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/carambei/panorama.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. ICRP 60 - Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press, v. 2, n. 1-3, 1991.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. ICRP 126 Radiological Protection against Radon Exposure. Oxford: Pergamon Press, v. 38, n. 1-2, 2008.
ICRP - International Commission on Radiological Protection. ICRP 65 - Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Oxford: Pergamon Press, v. 23, n. 2, 1993.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. ICRP 99 - Low Dose Extrapolation of Radiation Related Cancer Risk. Oxford: Pergamon Press, v. 35, n. 4, 2005.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 126 – Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP v. 43, n. 3, 2014.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 126 – Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP v. 43, n. 3, 2014.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 119 - Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP v.41 (s),2012.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 115 - Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. **Elsevier**, v. 40, n.1, 2010.

ICRP 26; "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". Annals of ICRP, 1, No. 3. 1977.

ICRP-60. International Commission on Radiological Protection (1990). Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. Disponível em: <http:// zs.thulb.uni-jena.de/receive/jportal_jparticle_00134890?>.

INCA – Instituto Nacional do Câncer. Carcinogênese: mecanismo de desenvolvimento dos tumores. 2016.

KUMAR, R., MAHUR, A.K., RAO, N.S., SENGUPTA, D., PRASAD, R. Radon exalation rate from sand samples from the newly discovered high background radiation area at Erasma beach placer deposit of Orissa, India. **Radiation Measurements**, v. 43, p. S508- S511, 2008.

LARA, E.; ROCHA, Z.; PALMIERI, H. E. L.; SANTOS, T. O.; RIOS, F. J.; OLIVEIRA, A. H. "Radon concentration in soil gas and its correlations with pedologies, permeabilities and 226Ra content in the soil of the Metropolitan Region of Belo Horizonte–RMBH, Brazil". Radiation **Physics and Chemistry**, 116, 317-320. 2015.

MARQUES, Adilson Lima; GERALDO, Luiz Paulo; SANTOS, Wlademir dos. Níveis de radioatividade natural decorrente do radônio no complexo rochoso da Serra de São Vicente, SP. **Radiol Bras**, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 215-218, Junho 2006.

MARTIN, A. C. Avaliação da radioatividade natural na região do manancial da APA Passaúna em Campo Largo/RMC. 2019. 71 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

MAZZILLI, B. P; Marcelo M. F; CAMPOS, PM. Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Universidade de São Paulo, São Paulo 2011.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. COORDENAÇÃO NACIONAL DE CONTROLE DE TABAGISMO - CONTAPP. "Falando Sobre Câncer e Seus Fatores de Risco". Rio de Janeiro, 1996.

NARLOCH, D. C. **Medidas de concentração de radônio proveniente de argamassas de cimento portland, gesso e fosfogesso**. 2015. 104 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

NARLOCH, D. C.; PASCHUK, S. A.; CORRÊA, J. N.; ROCHA, Z.; MAZER, W.; TORRES, C. A. M. P.; DEL CLARO, F.; DENYAK, V.; SCHELIN, H. R. Characterization of radionuclides present in portland cement, gypsum and phosphogypsum mortars. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 155, p. 315-318, 2019.

NEMAN, R. S. **Medida da contaminação radioativa do ar ambiental por radônio-222 e filhos em residências de Campinas-SP**, Brasil. 2000. 89 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Insituto de Fisica "Gleb Wataghin", Campinas, SP.

NEZNAL, M., NEZNAL, M., SMARDA, J. Intercomparison measurement of soil-gas radon concentration. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 72, n.2, p.139-144, 1997.

NNDC – National Nuclear Data Center. Chart of Nuclides from Brookhaven National laboratory. Disponível em: http://www.nndc.bnl.gov/chart.

NNDC. National Nuclear Data Center. Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory. Disponível em: www.nndc.bnl.gov/chart.

NNDC. National Nuclear Data Center. Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory. Disponível em: www.nndc.bnl.gov/chart.

NOGUEIRA, A. C. **Comportamento hidrogeoquímico dos isótopos de rádio e radônio e a qualidade das águas subterrâneas na região da província uranífera de Lagoa Real**, Bahia. Dissertação de mestrado. Salvador, 2018.

OIKAWA, S.; KANNO, N.; SANADA, T.; OHASHI, N.; UESUGI, M.; SATO, K.; ABUKAWA, J; HIGUCHI, H. Anationwide survey of outdoor radon oncentration in Japan, **Journal of Environmental Radioactivity**,Volume 65, Issue 2, 2003.

OKUNO, E. ;YOSHIMURA, E. Física das Radiações. Oficina de Textos: São Paulo. 1 ed. v. 1, p. 203 – 221, 2010.

PERNA, A. F. N. **Taxa de Exalação de Radônio-222 de Concreto e Argamassa de Cimento Usados na Construção Civil**. 2016. 94 p. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

PERNA, A. F. N.; PASCHUK, S. A.; CORRÊA, J. N.; NARLOCH, D. C.; BARRETO, R. C.; DEL CLARO, F. ; DENYAK, V. Exhalation rate of radon-222 from concrete and cement mortar. **Nukleonika**, v. 63, p. 65-72, 2018.

RAHMAN, S. M. N.; MATIULLAH, G. B. Radon exhation rate from the soil, sand and brick samples collected from NWFP and Fata, Pakistan. Radiation Protection Dosimetry, v.124, n. 4, p. 392-399, 2007.

SAKODA, A.; ISHIMORI,Y.; YAMAOKA, K., A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock soil, Mill tailing and fly ash. **Applied Radiation and Isotopes**. v. 69, p. 1422-1435, 2011.

SANTOS, C. E. L. **Determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorite e carvão do estado de Santa Catarina: critérios para avaliação dos riscos biológico**s. 2008. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

SANTOS, C. E. L. Correlação entre a geologia e as concentrações de Radônio no município **de Encruzilhada do Sul, estado do Rio Grande do Sul: avaliação das doses e dos riscos radiológicos a que a população local está submetida. Porto Alegre:** IGEO/UFRGS**, 2017.**

SANTOS, T. O. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte-RMBH**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Nuclear - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte. 2010.

SCHMID, DREXLER e KUWERT. Radon in Indoor Spaces: An Underestimated Risk Factor for Lung Cancer in Environmental Medicine. 2010. Institut für Arbeits, Sozial und Umweltmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg e Klinische Nuklearmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg.

SES-MG – Secretaria de Estado da Saúde de Minas Gerais. Programa de avaliação e vigilância do câncer e seus fatores de risco de Minas Gerais. V. I, 2013.

SILVA, A. A. R. **Radônio e filhos em residências da cidade de São Paulo**. 2005. Tese (Doutorado em Física)- Instituto de Física. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SOUZA, A.F.C. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Doses Visando o Uso de NORM em Materiais de Construção.** 2009. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Nuclear, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.

SPIRO, Thomas G. e STIGLIANI, William M. Química Ambiental. 2ª edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2009, p. 35 a 39.

TAKARLI, M.; PRINCE-AGBODJAN, W. Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage. **Journal of ASTM International**, v. 5, n. 3, p. 1 – 13, 2008.

TILLY JUNIOR, J.G. Física Radiológica. Guanabara Koogan Ltda: Rio de Janeiro. 1 ed. v. 1, p. 141 – 197, 2010.

TURNER, J. E. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. 3ª ed. Wiley-VCH Verlag, 2007.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly, 2006.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo A, 2008. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Radiation from natural sources**, annex E. 1962. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces, annex E, v. II, 2006.UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex A, 1993. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR–United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, annexE, I, 2010. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

WHO – World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. Switzerland: WHO press, 2017.

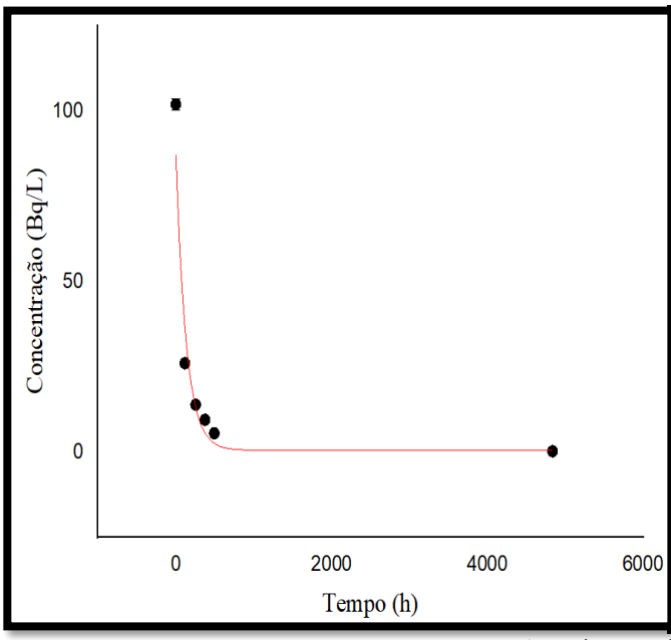
WHO – World Health Organization. Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

WHO – World Health Organization. Radon and Health. 2004. Disponível em: http://www.who.int/phe/radiation/en/2004Radon.pdf.

WHO–World Health Organization. Healthris kassessment, Switzerland: WHO press, 2011.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DAS MEDIDAS DE ÁGUAS DE POÇOS

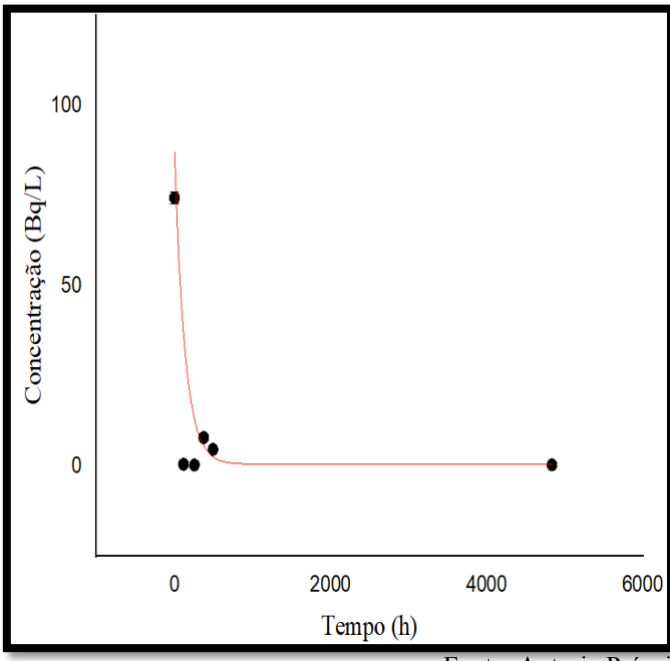
Figura A1: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 2.



Poço 2	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	101,9	1,6
Medição 2	115	26,1	0,7
Medição 3	234	13,9	0,4
Medição 4	352	9,5	0,4
Medição 5	472	5,6	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,31	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,6	0,7	**87**	13

Fonte: Autoria Própria (2021).

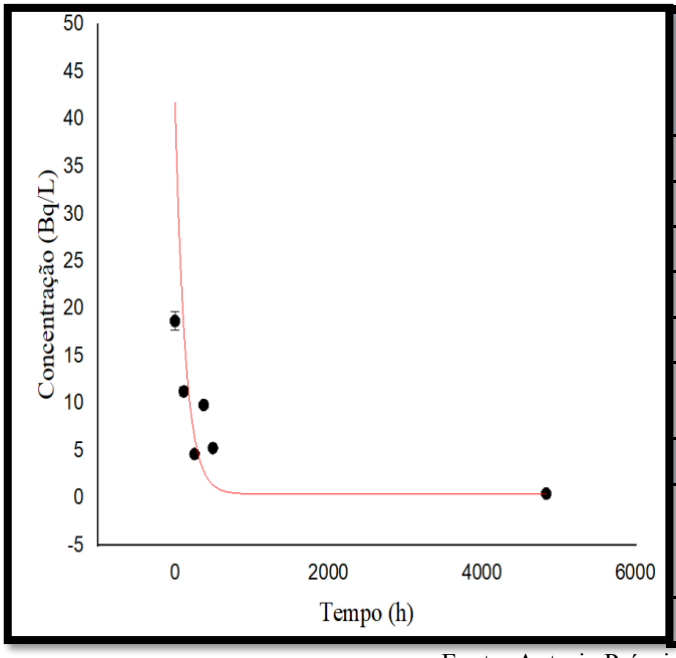
Figura A2: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 3.



Poço 3	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	74,3	1,7
Medição 2	115	0,6	0,1
Medição 3	234	0,4	0,1
Medição 4	352	7,9	0,3
Medição 5	472	4,7	0,3
Equilibrio Secular	4344	0,41	0,04
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
1,4	2,5	**0,4**	1,2

Fonte: Autoria Própria (2021).

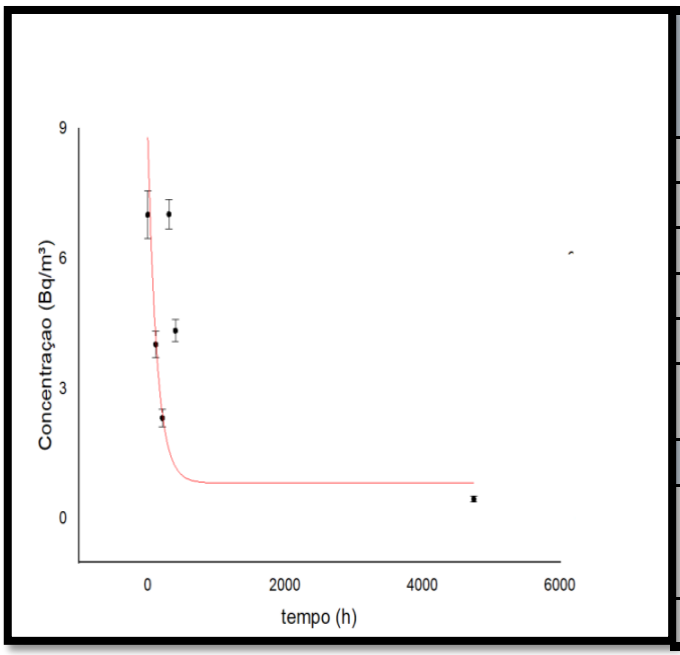
Figura A3: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 4.



Poço 4	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	18,8	1,0
Medição 2	115	11,3	0,5
Medição 3	234	4,7	0,3
Medição 4	352	9,9	0,3
Medição 5	472	5,3	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,47	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
1,0	0,9	**25,3**	9,8

Fonte: Autoria Própria (2021).

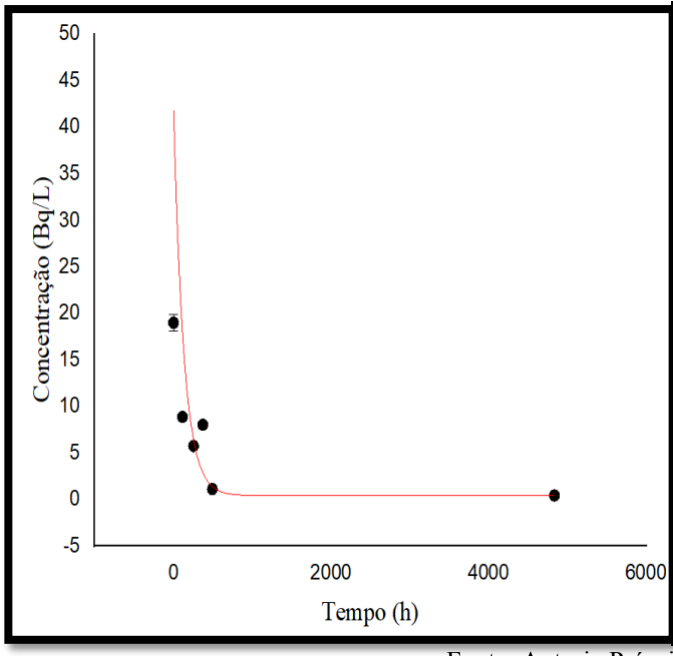
Figura A4: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 5.



Poço 5	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	7,0	0,3
Medição 2	115	4,0	0,2
Medição 3	234	2,3	0,3
Medição 4	352	7,0	0,2
Medição 5	472	4,3	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,45	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,8	0,7	**8,8**	4,3

Fonte: Autoria Própria (2021).

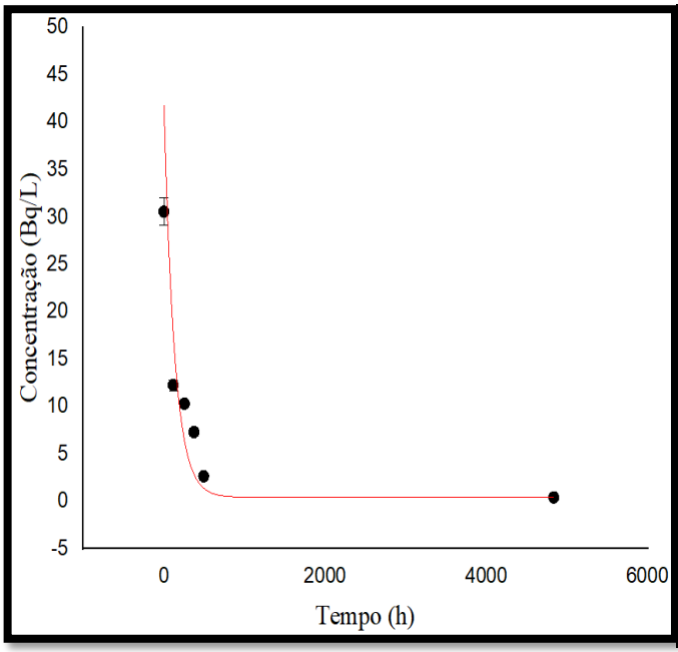
Figura A5: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 6.



Poço 6	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	19,0	0,9
Medição 2	115	9,0	0,4
Medição 3	234	5,8	0,4
Medição 4	352	8,1	0,4
Medição 5	472	1,1	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,45	0,07
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
3,8	2,3	**0,4**	0,8

Fonte: Autoria Própria (2021).

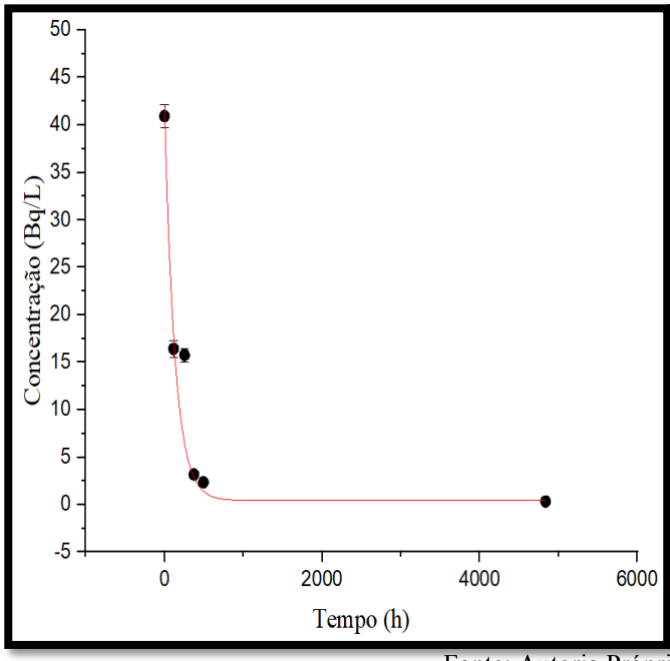
Figura A6: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 7.



Poço 7	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	30,6	1,5
Medição 2	115	12,3	0,6
Medição 3	234	10,3	0,4
Medição 4	352	7,3	0,4
Medição 5	472	2,7	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,43	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,4	0,3	**36,5**	5,7

Fonte: Autoria Própria (2021).

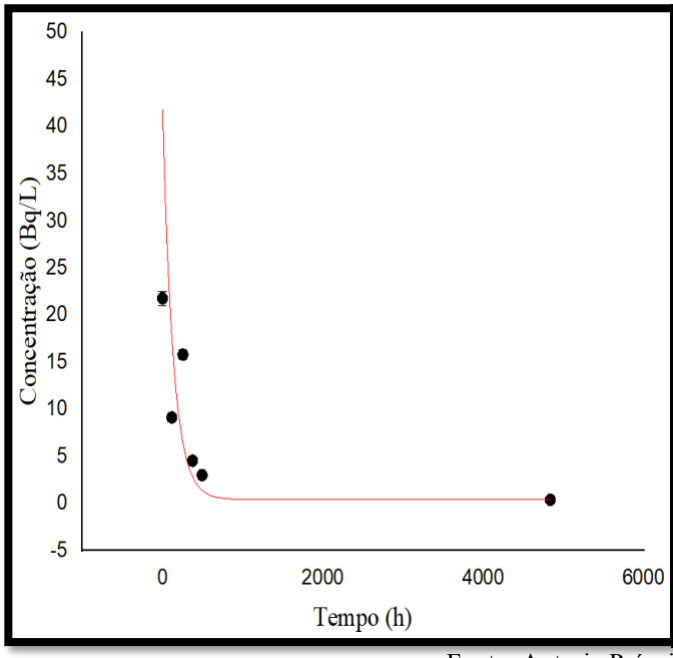
Figura A7: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 8.



Poço 8	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	40,9	1,2
Medição 2	115	16,4	0,9
Medição 3	234	15,8	0,7
Medição 4	352	3,2	0,3
Medição 5	472	2,4	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,34	0,06
Resultado			
C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)	C ^{22}Ra (Bq/L)	Erro ^{22}Ra (Bq/L)
0,3	0,2	**42,8**	4,9

Fonte: Autoria Própria (2021).

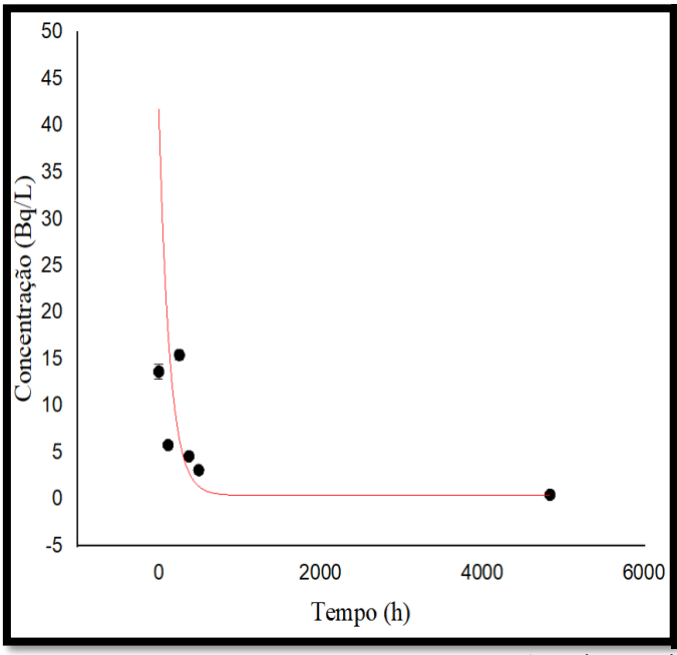
Figura A8: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 9.



Poço 9	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	21,8	0,8
Medição 2	115	9,1	0,3
Medição 3	234	15,8	0,5
Medição 4	352	5,6	0,2
Medição 5	472	3,0	0,3
Equilibrio Secular	4344	0,41	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,6	0,5	**25,4**	5,8

Fonte: Autoria Própria (2021).

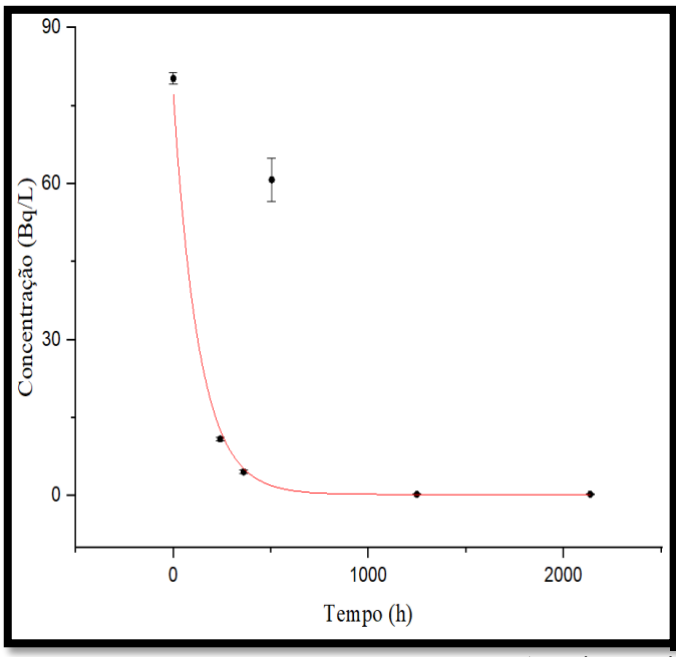
Figura A9: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 10



Poço 10	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	13,7	0,8
Medição 2	115	5,8	0,3
Medição 3	234	15,5	0,6
Medição 4	352	4,6	0,3
Medição 5	472	3,2	0,2
Equilibrio Secular	4344	0,51	0,07
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,6	0,5	**17,3**	6,0

Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A10: Concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn para o poço 11.



Poço 11	Tempo (horas)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
Medição 1	0	80,2	1,1
Medição 2	115	10,9	0,4
Medição 3	234	4,6	0,3
Medição 4	352	60,8	4,2
Medição 5	472	0,26	0,06
Equilibrio Secular	4344	0,31	0,06
Resultado			
C ^{226}Ra (Bq/L)	Erro ^{226}Ra (Bq/L)	C ^{222}Rn (Bq/L)	Erro ^{222}Rn (Bq/L)
0,3	0,3	**77,2**	7,7

Fonte: Autoria Própria (2021).

APÊNDICE B – LISTA DOS PONTOS DE MEDIDAS

Os números correspondentes as amostras de águas de poços (P1 ao P11), as rochas graníticas (R1, R2, R7 e R9) e solos (S1, S7 e S9).

Medidas	Latitude	Longitude
1	24º57'28"	50º01'58"
2	24º56'04"	50º00'41"
3	24º56'44"	50º00'48"
4	24º56'46"	50º00'47"
5	24º57'35"	50º01'14"
6	24º57'29"	50º01'18"
7	24º57'30"	50º01'04"
8	24º57'27"	50º00'31"
9	24º57'30"	50º00'27"
10	24º57'30"	50º00'27"
11	24º55'55"	50º00'41"