

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO SANAS ZAMBONI

**LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM PROPRIEDADES PARTICULARES
LOCALIZADAS NA APA DO RIO PASSAÚNA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2024

RODRIGO SANAS ZAMBONI

**LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM PROPRIEDADES PARTICULARES
LOCALIZADAS NA APA DO RIO PASSAÚNA**

**Radiometric survey in private properties located in the Passaúna River
Environmental Protection Area (APA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências” - Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Sergei Anatolyevich Paschuk
Coorientadora: Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

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



RODRIGO SANAS ZAMBONI

LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM PROPRIEDADES PARTICULARES LOCALIZADAS NA APA DO RIO PASSAÚNA

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

Data de aprovação: 17 de Abril de 2024

Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Flavio Bentes Freire, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

Dr. Nivaldo Carlos Da Silva, Doutorado - Laboratório de Poços de Caldas - Lapoc

Dr. 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 26/06/2024.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Os dois anos de pesquisa foram repletos de experiências inéditas. Sem a presença da minha companheira, não teria alcançado minhas conquistas pessoais e profissionais. Obrigado Camila!

Gostaria de ressaltar o papel da minha família neste longo percurso. Obrigado a todos!

Agradeço de maneira especial a cada um dos moradores que gentilmente cederam seus espaços de convívio familiar para a realização da pesquisa.

Agradeço ao meu orientador Prof. Sergei Anatolyevich Paschuk, pelo trabalho realizado em grupo.

À minha coorientadora, Prof. Janine Nicolosi Corrêa, pelo apoio na elaboração do texto.

Ao CPGEI, pela formação acadêmica e suporte na participação de eventos.

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

Há cerca de 15 anos, a radiação do urânio foi descoberta por Henri Becquerel e, dois anos depois, o estudo desse fenômeno foi estendido a outras substâncias, primeiro por mim, e depois por Pierre Curie e por mim. Este estudo levou-nos rapidamente à descoberta de novos elementos, cuja radiação, embora análoga à do urânio, era muito mais intensa. Todos os elementos emissores dessa radiação eu chamei de radioativos, e a nova propriedade da matéria revelada nessa emissão recebeu assim o nome de radioatividade (MARIE CURIE, 1911).

RESUMO

Materiais radioativos de ocorrência natural estão presentes nos diversos compartimentos do ecossistema desde a formação do planeta. Dentre eles, nas séries de decaimento dos nuclídeos primordiais, destacam-se os isótopos de radônio, os quais são responsáveis por mais da metade da dose recebida por humanos em decorrência de fontes naturais de radiação. Ademais, os descendentes do radônio são a segunda principal causa global de câncer de pulmão, atrás apenas do tabaco. Além do radônio, outro importante isótopo contribuinte para a exposição humana é o ^{40}K , isótopo amplamente difundido na crosta terrestre em coberturas sedimentares específicas. Neste sentido, o monitoramento de nuclídeos ativos em rochas, solos, águas subterrâneas e no ar de ambientes de convívio é de extrema importância, tanto para fornecer dados à comunidade científica quanto para possibilitar intervenção mitigatória às partes interessadas. Logo, o objetivo deste trabalho foi realizar o levantamento radiométrico em propriedades particulares localizadas na APA do Rio Passaúna (Curitiba, PR). Para as medições das concentrações de ^{222}Rn e ^{226}Ra nas águas de poços de abastecimento, bem como de ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo foi utilizado o equipamento AlphaGUARD PQ2000 PRO (Saphymo, atual *Bertin Technologies*). A espectrometria gama superficial externa foi executada com o cintilador portátil BRD-AT6101C (Atomtex). A análise dos dados gamaespectrométricos detectou a presença de ^{40}K em todos os terrenos estudados, fato consistente com o mapa geológico do estado do Paraná, que apresenta regiões potencialmente ricas em feldspato potássico. Outros nuclídeos também foram encontrados em menor escala, casos do ^{226}Ra e ^{232}Th . As doses equivalentes foram relativamente baixas, à exceção de um ponto localizado em uma das propriedades com valor estimado de dose igual a $1,65 \mu\text{Sv/h}$. Neste ponto foi realizada a aferição do ar do solo, resultando numa concentração de $(664 \pm 36) \text{ kBq/m}^3$ do isótopo ^{220}Rn . No tocante às águas, 7 dos 9 poços analisados apresentaram valores de dose comprometida efetiva para ingestão e inalação de ^{226}Ra e ^{222}Rn acima dos níveis de referência internacionais, fato que torna tais águas impróprias para consumo do ponto de vista radiológico. Por outro lado, o monitoramento do ar das habitações constatou valores que variaram de (30 ± 2) a $(270 \pm 20) \text{ Bq/m}^3$, dentro da normalidade. Este trabalho está em consonância com a preocupação federal acerca dos requisitos básicos de radioproteção em território brasileiro, materializada na norma NN 3.01 da CNEN, publicada em março de 2024. Também possui relevância social imediata e necessita ser expandido na região, onde o abastecimento de água é majoritariamente efetuado por meio de poços. Outrossim, dados desta natureza são ainda incipientes na região sul do país e carecem de atenção científica.

Palavras-chave: NORM; radioatividade natural; radônio; águas subterrâneas; espectrometria gama.

ABSTRACT

Naturally occurring radioactive materials have been present in several compartments of the ecosystem since the planet's formation. Among them, in the decay series of primordial nuclides, radon isotopes stand out, which are responsible for more than half of the dose received by humans from natural radiation sources. Additionally, radon progeny are the second leading global cause of lung cancer, second only to tobacco. Besides radon, another significant isotope contributing to human exposure is ^{40}K , which is widely disseminated in the Earth's crust within specific sedimentary coverings. Consequently, monitoring active nuclides in rocks, soils, groundwater, and air in living environments is of paramount importance, both to provide data to the scientific community and to enable mitigative interventions for stakeholders. Therefore, the objective of this study was to conduct a radiometric survey in private properties located in the Rio Passaúna Environmental Protection Area (Curitiba, PR). For measuring concentrations of ^{222}Rn and ^{226}Ra in well water and ^{222}Rn and ^{220}Rn in soil air, the AlphaGUARD PQ2000 PRO (Saphymo, currently Bertin Technologies) was used. External surface gamma spectrometry was performed using the BRD-AT6101C portable scintillator (Atomtex). Gamma spectrometric data analysis detected the presence of ^{40}K in all studied terrains, a finding consistent with the geological map of the state of Paraná, which indicates regions potentially rich in potassium feldspar. Other nuclides, such as ^{226}Ra and ^{232}Th , were also found on a smaller scale. Equivalent doses were relatively low, except for one point in one of the properties with an estimated dose value of $1.65 \mu\text{Sv/h}$. At this point, soil air measurement indicated a concentration of $(664 \pm 36) \text{ kBq/m}^3$ of the isotope ^{220}Rn . Regarding water, 7 out of 9 analyzed wells showed effective committed dose values for ingestion and inhalation of ^{226}Ra and ^{222}Rn above international reference levels, rendering these waters unsuitable for consumption from a radiological perspective. On the other hand, monitoring the air in residences showed values ranging from (30 ± 2) to $(270 \pm 20) \text{ Bq/m}^3$, within normal limits. This work aligns with the federal concern regarding the basic radioprotection requirements in Brazilian territory, as established by the NN 3.01 standard of the CNEN, published in March 2024. It also has immediate social relevance and needs to be expanded in the region, where water supply is predominantly provided by wells. Furthermore, data of this nature are still incipient in the southern region of the country and require scientific attention.

Keywords: NORM; natural radioactivity, radon, groundwater, gamma spectrometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais vias de transferência de radionuclídeos no ecossistema	21
Figura 2 – Fontes de exposição humana às radiações ionizantes (estimativa global UNSCEAR).....	22
Figura 3 – Espectro de emissão de radiação gama da série de decaimento do ^{238}U	26
Figura 4 – Espectro de emissão de radiação gama da série de decaimento do ^{232}Th	27
Figura 5 – Espectro da radiação gama emitida durante a transmutação de ^{40}K em ^{40}Ar	27
Figura 6 – Espectro típico de raios gama transportados pelo ar exibindo as posições das janelas de energia convencionais.....	28
Figura 7 – Representação da geração e transporte de Rn no solo e sua entrada no ar.....	32
Figura 8 – Mapa radiométrico brasileiro (SGB-CPRM).....	34
Figura 9 – Vias de entrada e acúmulo de ^{222}Rn em residências.....	37
Figura 10 – AlphaGUARD acoplado ao AlphaKIT para medição de ^{222}Rn em amostras de água.....	39
Figura 11 – AlphaGUARD acoplado à sonda para medição de ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo.....	39
Figura 12 – Esquema da medição de Rn no ar do solo.....	41
Figura 13 – Representação da medição dos isótopos de ^{222}Rn e ^{220}Rn pelo AlphaGUARD.....	42
Figura 14 – Documentos publicados por ano.....	48
Figura 15 – Publicações por território.....	48
Figura 16 – Publicações por assunto.....	49
Figura 17 – Região do estudo radiométrico.....	54
Figura 18 – Mapeamento gama P1 (GARM).....	62
Figura 19 – Mapeamento gama P2 (GARM).....	67
Figura 20 – Mapeamento gama P3 (GARM).....	69
Figura 21 – Mapeamento gama P4 (GARM).....	72
Figura 22 – Mapeamento gama P5 (GARM).....	74
Figura 23 – Mapeamento gama P6 (GARM).....	76
Figura 24 – Mapeamento gama P7 (GARM).....	79
Figura 25 – Mapeamento gama P8 (GARM).....	82
Figura 26 – Mapa gerado pelo código python (propriedade 1) executado no ambiente virtual do Google Colab®.....	85
Fotografia 1 – Detector portátil BRD.....	56
Fotografia 2 – Arranjo experimental do equipamento AlphaGUARD acoplado ao AquaKIT.....	57
Fotografia 3 – Medida de Rn e Tn no ar do solo <i>in loco</i>	58
Fotografia 4 – Câmara de difusão.....	59
Fotografia 5 – Traços no CR-39 referentes ao ‘quarto do filho’ (foto do microscópio ótico).....	64
Gráfico 1 – Ajuste das concentrações de ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo.....	63

Gráfico 2 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo nas amostras de água dos poços Po1A e Po1B	66
Gráfico 3 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po2	68
Gráfico 4 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po3	70
Gráfico 5 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po4	73
Gráfico 6 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po5	75
Gráfico 7 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po6	77
Gráfico 8 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po7	81
Gráfico 9 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po8	83
Quadro 1 – Modelos matemáticos de concentração de ^{222}Rn em águas subterrâneas a partir da concentração de ^{238}U nas rochas.....	36
Quadro 2 – Definição dos descritores e similares	47
Quadro 3 – Caminho de busca com operadores Booleanos.....	47
Quadro 4 – Publicações relacionadas ao tema desta pesquisa.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Série de decaimentos do ^{238}U	23
Tabela 2 – Série de decaimentos do ^{232}Th	24
Tabela 3 – Janelas de energia de raios gama recomendadas para mapeamento de radioelementos naturais (IAEA, 1991)	28
Tabela 4 – Concentração de ^{222}Rn <i>indoor</i> na residência 1A.....	64
Tabela 5 – Concentração de ^{222}Rn <i>indoor</i> na residência 1B.....	64
Tabela 6 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po1A.....	65
Tabela 7 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po1B.....	65
Tabela 8 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po2	68
Tabela 9 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po3	70
Tabela 10 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po4	73
Tabela 11 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po5	75
Tabela 12 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po6	77
Tabela 13 – Concentração de ^{222}Rn <i>indoor</i> na residência 7A.....	80
Tabela 14 – Concentração de ^{222}Rn <i>indoor</i> na residência 7B.....	80
Tabela 15 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po7	80
Tabela 16 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po8	83
Tabela 17 – Resultado compilado das análises das águas	86
Tabela 18 – Dose comprometida efetiva (CED) para ingestão de ^{222}Rn e ^{226}Ra	87
Tabela 19 – Dose comprometida efetiva (CED) para inalação de ^{222}Rn	88
Tabela 20 – Resultado final da análise das águas.....	88
Tabela 21 – Valores coletados de espectrometria gama superficial	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NORM	<i>Naturally Occurring Radioactive Materials</i>
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
APA	Área de Proteção Ambiental
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
LFNA	Laboratório de Física Nuclear Aplicada
UTFPR-CT	Universidade Tecnológica Federal do Paraná – <i>campus</i> Curitiba
RnD	Radônio e seus Descendentes
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
Ppm	Partes Por Milhão
SSNTD	<i>Solid State Nuclear Track Detector</i>
GARM	<i>Geolocation Application for Radiation Monitoring</i>
CDTN	<i>Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

NaI (TI)	Iodeto de Sódio dopado com Tório
Bq	Um Becquerel representa a ocorrência de uma desintegração nuclear por segundo
λ	Constante de decaimento de um radioisótopo
®	Marca registrada
eU	Equivalente Urânio
eTh	Equivalente Tório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Delimitação da pesquisa	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Referencial teórico	21
2.1.1	Radioatividade natural.....	21
2.1.2	Espectrometria gama de baixa resolução	26
2.1.3	Radônio	30
<u>2.1.3.1</u>	<u>Radônio nas rochas e no solo</u>	<u>31</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Radônio nas águas subterrâneas</u>	<u>35</u>
<u>2.1.3.3</u>	<u>Radônio no ar</u>	<u>37</u>
<u>2.1.3.4</u>	<u>Deteccção dos isótopos de radônio</u>	<u>38</u>
<u>2.1.3.5</u>	<u>Modelos matemáticos para análise quantitativa de Rn, Tn e Ra</u>	<u>40</u>
2.1.3.5.1	<i>AlphaGUARD em medições do ar do solo</i>	40
2.1.3.5.2	<i>AlphaGUARD em medições de Rn e Ra na água</i>	43
2.1.3.5.3	<i>Detector de estado sólido (CR-39) em medições de Rn indoor</i>	45
2.1.4	Regulamentações nacionais	45
2.2	Estado da arte	46
2.2.1	Análise bibliométrica.....	47
2.2.2	Discussão sobre as obras apresentadas.....	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	Detalhamento da pesquisa de campo	55
3.2	Espectrometria gama de baixa resolução	56
3.3	Medições de atividade alfa	57
3.3.1	Atividade de ²²² Rn e ²²⁶ Ra nas águas de poço	57
3.3.2	Atividade de ²²² Rn e ²²⁰ Rn no ar do solo	58
3.3.3	Atividade de ²²² Rn indoor	59
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
4.1	Propriedade 1	61
4.2	Propriedade 2	66

4.3	Propriedade 3.....	68
4.4	Propriedade 4.....	70
4.5	Propriedade 5.....	74
4.6	Propriedade 6.....	76
4.7	Propriedade 7.....	78
4.8	Propriedade 8.....	82
4.9	Código Python para leitura dos arquivos .txt gerados pela espectrometria gama	84
4.10	Compilação dos resultados.....	86
4.10.1	Potabilidade radiológica das águas	86
4.10.2	Mapeamento superficial de radionuclídeos	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
	REFERÊNCIAS.....	93
	APÊNDICE A - CÓDIGO EM LINGUAGEM PYTHON PARA TRATAMENTO DOS DADOS DE ESPECTROMETRIA GAMA SUPERFICIAL (EQUIPAMENTO AT6101C ATOMTEX).....	99

1 INTRODUÇÃO

A transição do século XIX para o XX foi marcada por uma efervescência científica, sobretudo no campo da física, tanto teórica quanto experimental. Os estudos de Max Planck sobre os radiadores harmônicos e Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico e as teorias da relatividade, por exemplo, dimensionam este período histórico de extrema relevância para a humanidade (MARTINS, 1998a, 1998b; DIONÍSIO, 2005)

São contemporâneos os trabalhos pioneiros acerca da atividade de isótopos químicos. Roentgen, Poincaré, Becquerel, Henry, Pierre Curie e Marie Curie são exemplos de cientistas envolvidos nos estudos a respeito dos raios X e da radioatividade, temas até então pouco compreendidos (MARTINS, 1990, 1998b).

O casal Curie trabalhou de maneira incessante na caracterização de radioisótopos puros e também com compostos naturais, dos quais destacam-se a *pechblenda* (óxido de urânio) e a calcocita (fosfato de cobre).

Minerais como estes estão presentes em rochas crustais desde a formação do planeta Terra, com abundância de radionuclídeos diversos em suas composições. Urânio, tório e potássio recebem posição de destaque, devido ao fato de serem litófilos (maior afinidade com rochas ígneas ácidas) e iniciarem as principais cadeias de decaimentos radioativos (BONOTTO, 2004).

No entanto, a presença de materiais radioativos de ocorrência natural (do inglês: NORM – *Naturally Occurring Radioactive Materials*) não se limita às rochas. Os diversos compartimentos do ecossistema, como as águas subterrâneas e o solo, também podem conter concentrações expressivas dos NORMs, inclusive com mecanismos específicos de transferência de radionuclídeos entre si (MAZZILLI, 2016).

De maneira abrangente, o termo radiação ionizante natural abarca as radiações cósmica, cosmogênica e terrestre. A primeira, com procedência do espaço; a segunda, originada na interação dos raios cósmicos com elementos da atmosfera da Terra; a terceira, proveniente dos NORMs na crosta terrestre. Este conjunto de radiações configura a principal fonte de exposição humana aos fótons de alta energia (BONOTTO, 2004; UNSCEAR, 2008).

Agências e comitês com cooperação internacional têm avaliado os desdobramentos da exposição humana às radiações naturais e artificiais desde o

período pós-guerra. Estudos realizados pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) estimam que o radônio e seus descendentes de meia-vida curta são responsáveis por aproximadamente metade da dose efetiva anual recebida pelo homem em razão de fontes naturais de radiação (UNSCEAR, 2008).

O radônio é um dos produtos do decaimento dos nuclídeos químicos primordiais, sendo que seus isótopos possuem o estado gasoso à temperatura ambiente. Por esta razão, rochas, águas e solos ricos em urânio e tório emanam isótopos ativos de radônio espontaneamente.

A inalação deste gás configura um alto risco à saúde humana pela consequente irradiação das vias aéreas respiratórias por parte das partículas alfa advindas dos decaimentos sucessivos dos seus descendentes.

Esta exposição é globalmente associada à ocorrência de câncer de pulmão em humanos, sendo a segunda maior causa de mortes por câncer pulmonar atualmente, atrás apenas do tabaco. Ademais, produtos do decaimento do torônio (isótopo do ^{222}Rn com meia-vida mais curta) podem ser encontrados em outros órgãos além do pulmão devido à inalação do referido gás (UNSCEAR, 2008).

Os principais canais de exposição da população comum a este tipo de radiação são provenientes da exalação do radônio presente em britas, concreto e outros materiais de construção civil; edificações sobre solos com abundância dos isótopos químicos primordiais e inalação de particulados que carregam elementos ativos para o trato respiratório (CORRÊA *et al.*, 2014).

Neste contexto, evidencia-se a necessidade de pesquisas radiométricas no território brasileiro, não apenas em áreas notadamente anômalas. O fornecimento de novos elementos experimentais pode contribuir como método comparativo de dados já existentes obtidos com metodologia distinta, auxiliar na caracterização de regiões habitadas quanto a formação geoquímica, bem como subsidiar os cálculos de taxas de dose recebidas pela população e contribuir com medidas de proteção radiológica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é realizar um levantamento radiométrico em propriedades particulares situadas na região sudeste da Área de Proteção Ambiental do Rio Passaúna.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Tecer uma rede de dados concernentes à radiação gama natural na referida localização por meio do método do caminhamento;
- Determinar a presença superficial dos nuclídeos ^{238}U , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{220}Rn no solo da região através da espectrometria gama;
- Avaliar quantitativamente os isótopos ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo da região;
- Avaliar qualitativamente e quantitativamente os nuclídeos ^{222}Rn e ^{226}Ra nas águas de poços da região;
- Caracterizar propriedades particulares situadas na porção sudeste da APA do Rio Passaúna;
- Comparar os valores de radiação natural encontrados com os parâmetros internacionais de referência e limitantes estabelecidos.

1.2 Justificativa

O radônio é um gás radioativo originado no decaimento dos isótopos primordiais naturalmente ativos localizados na crosta terrestre. De maneira geral, a exposição a este gás em ambientes aerados não representa risco à vida. Entretanto, pesquisas realizadas em diversos continentes apontam que a inalação dos isótopos de radônio em espaços fechados causa graves prejuízos à saúde humana (ICRP, 2014).

Na década de 80, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) catalogou o radônio como um agente carcinógeno humano, pertencente ao mesmo grupo do amianto e do benzeno (IARC, 1988). Posteriormente, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) publicou que o risco da ocorrência de efeitos

estocásticos devido à radiação natural de fundo é de 1 em 700. Todavia, o risco associado à morte por doenças relacionadas ao radônio *indoor* é de 1 em 440 (IAEA, 2003).

Recentemente, o Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) divulgou que o radônio é a principal causa de câncer de pulmão em indivíduos não fumantes de tabaco e a segunda principal entre os fumantes (UNSCEAR, 2019). Desta maneira, a problemática da inalação do radônio e seus filhos de meia-vida curta se tornou uma questão de saúde pública, justificando pesquisas que monitoram a atividade desse gás em ambientes residenciais.

Tal atividade tem origem na emissão do radônio presente no solo e nas rochas para dentro das habitações. Litologias ricas em ^{238}U e ^{232}Th (geradores das cadeias dos isótopos ^{222}Rn e ^{220}Rn , respectivamente) apresentam maior potencial de contaminação do ar de edificações construídas sobre este terreno. Nesse sentido, a espectrometria gama auxilia na identificação de radionuclídeos superficiais e sinaliza pontos críticos para a aferição da atividade alfa no ar do solo.

No Brasil, por exemplo, há indícios da prevalência de câncer de mama em decorrência da exposição à radiação gama natural na cidade de Poços de Caldas, localizada sobre uma jazida de urânio (MEROLA *et al.*, 2017).

Além disso, a espectrometria é capaz de detectar a presença do isótopo de ^{40}K , uma das principais fontes de exposição humana externa.

Outro compartimento do ecossistema que é fonte considerável de exposição ao Rn são as águas subterrâneas. A ingestão direta de água com radônio dissolvido resulta no alojamento dos seus filhos em órgãos internos, principalmente no estômago. Os decaimentos sucessivos dos produtos do Rn liberam *quantuns* de energia ou partículas α e β que danificam os tecidos humanos e aumentam o risco do desenvolvimento de câncer (EPA, 2014).

No entanto, cerca de 90% da dose atribuível ao radônio dissolvido em água potável advém da inalação deste gás quando liberado durante agitação ou aquecimento da referida água. Por este motivo, atividades corriqueiras como tomar banho e lavar louça podem configurar canais de risco à saúde caso essa exposição aconteça de maneira prolongada e constante (UNSCEAR, 2020).

Diante do exposto, a caracterização de propriedades abarca três frentes principais, a saber, o monitoramento do ar de ambientes de convívio, a quantificação

de radônio e rádio em amostras da água que abastece a residência e a varredura do terreno externo para identificação de radioisótopos superficiais.

1.3 Delimitação da pesquisa

A Área de Proteção Ambiental do Rio Passaúna, conhecida como APA do Rio Passaúna, foi criada pelo decreto estadual nº 458 no ano de 1991 e abrange parte dos municípios de Curitiba, Campo Largo, Araucária e Almirante Tamandaré. Com o intuito de preservar e recuperar a bacia hidrográfica do Rio Passaúna – local que abriga o manancial que fornece cerca de 20% da água potável consumida pela cidade de Curitiba e região metropolitana, foi elaborado um plano de manejo com restrições de uso do solo e da água na região. Este fato atrelado ao hábito econômico-cultural da comunidade local culmina no consumo prioritário de água proveniente de poços artesianos e semi artesianos por parte dos residentes.

Além disso, medidas preliminares de espectrometria gama indicaram pontos no local com índices relativamente elevados de ^{232}Th e ^{226}Ra , justificando a escolha desta área para o desenvolvimento da pesquisa (MARTIN, 2019).

Este trabalho foi realizado ao longo do biênio 2022/2023 no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA/UTFPR-CT) e contou com a colaboração ativa tanto dos moradores – na coleta de amostras – quanto dos integrantes do grupo de pesquisa de radônio.

Em todas as propriedades caracterizadas foram recolhidas amostras de água dos respectivos poços e realizada a espectrometria gama superficial do solo. Estas medidas preliminares indicaram a demanda de monitoramento da atividade alfa no ar do solo de determinados pontos bem como a necessidade da avaliação do ar das habitações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

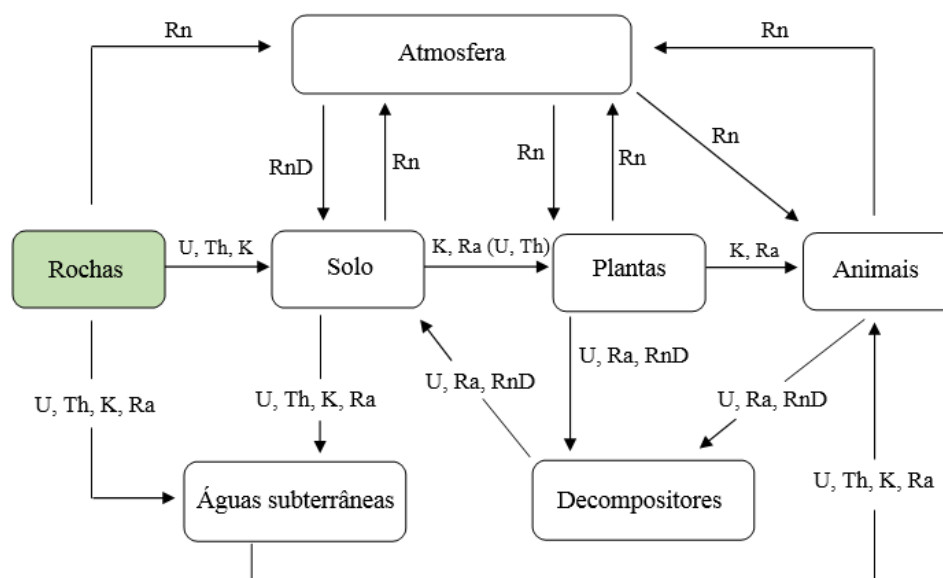
Este capítulo se divide em duas partes: (a) referencial teórico, texto que contém os alicerces teóricos e conceituais deste trabalho; (b) revisão bibliográfica, texto que analisa as principais obras relacionadas ao tema desta pesquisa.

2.1 Referencial teórico

2.1.1 Radioatividade natural

Radionuclídeos estão presentes na crosta terrestre desde a formação do planeta. Dentro da gama de elementos naturalmente ativos, somente aqueles com tempo de meia-vida comparável com a idade da Terra são detectáveis atualmente. Estes isótopos instáveis que inicialmente alojaram-se nas rochas crustais durante a formação do sistema solar foram gradualmente transferidos para os diversos compartimentos do ecossistema terrestre até atingirem a situação de equilíbrio (MAZZILLI, 2016). Na figura 1 estão representadas as principais vias de transferência dos nuclídeos primordiais e seus descendentes nos diversos compartimentos do ecossistema.

Figura 1 – Principais vias de transferência de radionuclídeos no ecossistema



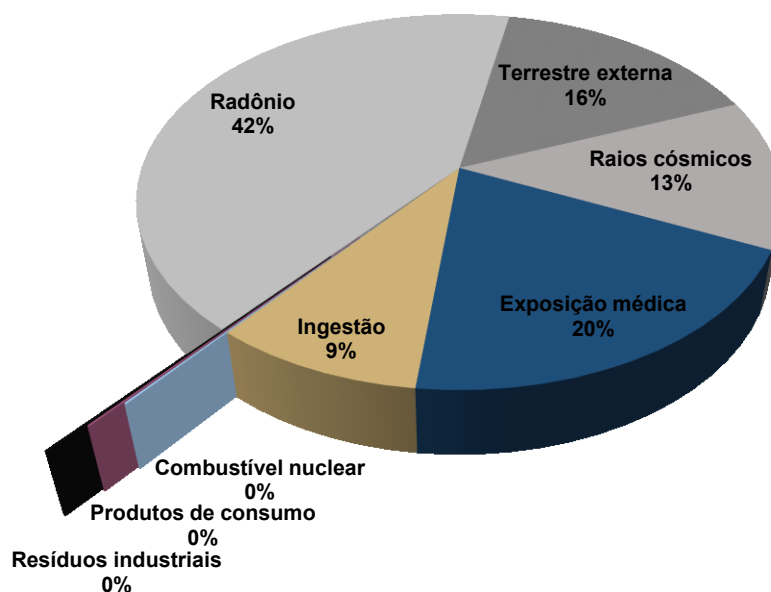
Fonte: Adaptado de Mazzilli (2016)

Observa-se que a atmosfera e as águas subterrâneas configuram-se como importantes canais de exposição humana à radiação. Além disso, o radônio e seus descendentes podem ser utilizados como traçadores dos isótopos primordiais.

A exposição humana à radiação ionizante natural é tipicamente fracionada em exposição externa, parcela referente à irradiação por fontes ativas localizadas fora do corpo humano e exposição interna, contribuição relativa a irradiação por fontes ativas localizadas dentro do corpo humano. Dentre essas possibilidades, outra métrica importante a ser observada são as exposições *indoor* e *outdoor*. A primeira, contabiliza a dose recebida em ambientes fechados, como residências, hospitais, instalações ocupacionais, etc. A segunda, concernente a dose recebida em ambientes ao ar livre, abertos, exterior às edificações (UNSCEAR, 2000).

De acordo com o relatório apresentado pela UNSCEAR no ano de 2008, o qual compilou os dados publicados em diversas partes do mundo acerca da dose recebida por humanos devido às diferentes fontes radioativas, concluiu-se que aproximadamente metade desta dose se deve ao gás radônio. Na figura 2 estão ilustradas as porcentagens de contribuição de cada fonte para a exposição humana.

Figura 2 – Fontes de exposição humana às radiações ionizantes (estimativa global UNSCEAR)



Fonte: Adaptado de UNSCEAR (2008)

Países que possuem a área da medicina nuclear, diagnóstica e radioterápica pouco desenvolvida, podem exibir a relação de porcentagens ligeiramente diferentes, diminuindo a fatia da exposição médica e aumentando as fatias das exposições a fontes naturais, por exemplo (UNSCEAR, 2008).

O ^{222}Rn é produto do decaimento do ^{226}Ra e ambos pertencem à série de decaimento do nuclídeo primordial ^{238}U , série que tem como fim a produção de ^{206}Pb estável. Analogamente, o ^{220}Rn é filho do ^{224}Ra e ambos estão contidos na série de decaimento do nuclídeo primordial ^{232}Th , a qual se encerra no ^{208}Pb , também estável. Nas tabelas 1 e 2 estão explicitadas as cadeias citadas juntamente com as informações de tempo de meia-vida de cada elemento e as respectivas energias de radiação emitida.

Tabela 1 – Série de decaimentos do ^{238}U

(continua)

Nuclídeo	Meia-vida	Energias preferenciais de radiação (MeV) e intensidades*		
		α	β	γ
^{238}U	4,468x10 ⁹ a	4,15 (23%) 4,19 (77%)	-	-
↓				
^{234}Th	24,1 d	-	0,103 (19%) 0,191 (81%)	0,063 (3,5%) 0,093 (4%)
↓				
^{234}Pa	1,18 m	-	2,29 (98%)	0,765 (0,30%) 1,001 (0,60%)
99,86% ↓ 0,14%				
^{234}Pa	6,7 h	-	0,53 (66%) 1,13 (13%)	0,10 (50%) 0,70 (24%) 0,90 (70%)
↓				
^{234}U	2,48x10 ⁵ a	4,72 (28%) 4,77 (72%)	-	0,053 (0,2%)
↓				
^{230}Th	7,52x10 ⁴ a	4,62 (24%) 4,68 (76%)	-	0,068 (0,6%) 0,142 (0,07%)
↓				
^{226}Ra	1602 a	4,60 (5,5%) 4,78 (94,5%)	-	0,186 (4%)
↓				
^{222}Rn	†3,8232 d	5,49 (100%)	-	0,510 (0,07%)
↓				
^{218}Po	3,05 m	6,11 (100%)	0,33 (100%)	-
↓				
99,98% ↓ 0,02%				
^{214}Pb	26,8 m	-	1,03 (6%)	0,295 (19%) 0,352 (36%)
↓				
^{218}At	2 s	6,65 (6%) 6,70 (94%)	0,67 (94%)	-
↓				

Tabela 1 – Série de decaimentos do ^{238}U

(conclusão)

Nuclídeo	Meia-vida	Energias preferenciais de radiação (MeV) e intensidades*		
		α	β	γ
^{214}Bi	19,7 m	5,61 (100%)	3,26 (100%)	0,609 (47%) 1,120 (17%) 1,764 (17%)
^{214}Po	164 μs	7,83 (100%)	-	0,799 (0,014%)
^{210}Tl	1,32 m	-	2,3 (100%)	0,296 (80%) 0,795 (100%) 1,31 (21%)
^{210}Pb	~22 a	3,7 ($1 \times 10^{-8}\%$)	0,017 (85%) 0,064 (15%)	0,047 (4%)
^{210}Bi	5,02 d	4,93 (60%) 4,89 (34%) 4,59 (5%)	1,155 (100%)	-
^{210}Po	138,3 d	5,30 (100%)	-	0,803 (0,0011%)
^{206}Tl	4,19 m	-	1,520 (100%)	-
^{206}Pb	Estável	-	-	-

(*) As intensidades referem-se à percentagem de desintegrações do próprio nuclídeo, não ao pai original da série.

Fonte: Adaptado de IAEA (2003) e [†]Laboratoire National Henri Becquerel (2010)

Tabela 2 – Série de decaimentos do ^{232}Th

(continua)

Nuclídeo	Meia-vida	Energias preferenciais de radiação (MeV) e intensidades*		
		α	β	γ
^{232}Th	$1,39 \times 10^{10}$ a	3,95 (24%) 4,01 (76%)	-	-
^{228}Ra	5,75 a	-	0,055 (100%)	- 0,093 (4%)
^{228}Ac	6,13 h	-	2,11 (100%)	0,34 (15%) 0,908 (25%) 0,96 (20%)
^{228}Th	1,913 a	5,34 (28%) 5,42 (71%)	-	0,084 (1,6%) 0,214 (0,3%)
^{224}Ra	3,64 d	5,45 (5,5%) 5,68 (94,5%)	-	0,241 (3,7%)

Tabela 2 – Série de decaimentos do ^{232}Th

(conclusão)

Nuclídeo	Meia-vida	Energias preferenciais de radiação (MeV) e intensidades*		
		α	β	γ
^{220}Rn	†55,8 s	6,30 (~100%)	-	0,55 (0,07%)
↓				
^{216}Po	0,145 s	6,78 (100%)	-	-
↓				
^{212}Pb	10,64 h	-	0,580	0,239 (47%) 0,300 (3,2%)
↓				
^{212}Bi	60,5 m	6,05 (70%) 6,09 (30%)	2,25 (100%)	0,040 (2%) 0,727 (7%) 1620 (1,8%)
↓				
^{212}Po	304 ns	8,78 (100%)	-	-
↓				
^{208}Tl	3,1 m	-	1,8 (100%)	0,511 (23%) 0,583 (86%) 0,860 (12%) 2,614 (100%)
↓				
^{208}Pb	Estável	-	-	-

(*) As intensidades referem-se à percentagem de desintegrações do próprio nuclídeo, não ao pai original da série.

Fonte: Adaptado de IAEA (2003) e †Laboratoire National Henri Becquerel (2011)

A ingestão ou inalação de Rn acarreta uma exposição interna significativa, pois seus produtos de decaimento possuem tempo de meia-vida curto. Como mostrado nas tabelas 1 e 2, esses tempos variam de alguns minutos a algumas horas, ocasionando a irradiação constante dos tecidos do pulmão e do trato intestinal com partículas α de energia característica da ordem de milhões de elétrons-volt.

2.1.2 Espectrometria gama de baixa resolução

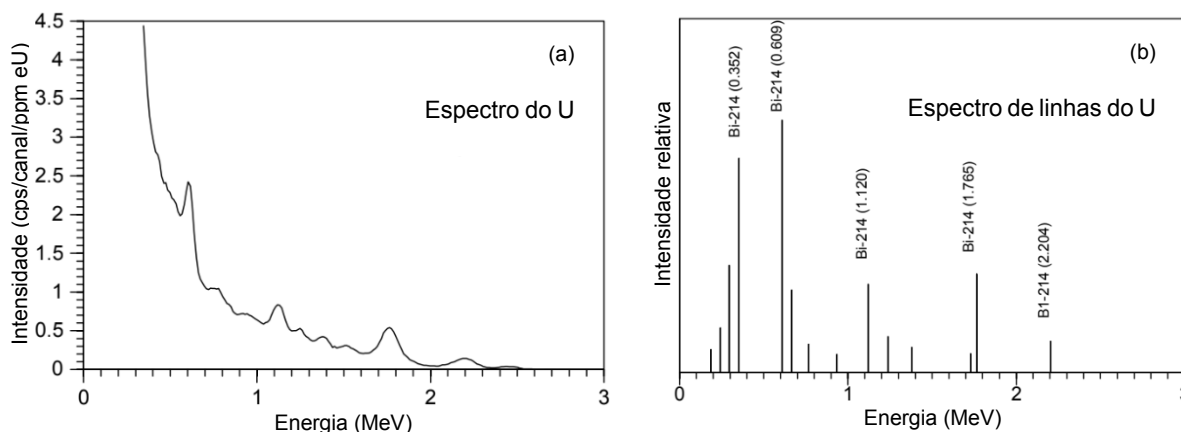
A espectrometria gama caracteriza-se como um método de identificação e quantificação de núclídeos ativos em amostras com diferentes matrizes. Por meio de um espectro que relaciona o número de contagens recebida em um determinado intervalo de tempo com a energia da radiação gama detectada, é possível distinguir elementos e posteriormente quantificá-los (ZHAO; ZHANG; FENG, 2016).

Durante o período pós-guerra, a exploração pujante de urânio culminou na aplicação deste método em levantamentos radiométricos aéreos nos Estados Unidos, União Soviética e Canadá. Nas décadas de 60 e 70, a espectrometria gama passou a ser aplicada também na mineração e no monitoramento ambiental (IAEA, 2003).

Embora o ^{238}U não emita radiação gama e as principais vias de desintegração dos núcleos de ^{226}Ra e ^{222}Rn sejam a emissão de partículas alfa, é possível realizar a espectrometria gama indireta destes elementos a partir de linhas espectrais características, como as do ^{214}Bi . De maneira semelhante, na série de decaimento do ^{232}Th , a identificação de ^{224}Ra e ^{220}Rn é comumente realizada a partir das linhas espectrais do ^{212}Pb , ^{208}Tl e ^{228}Ac (IAEA, 2003).

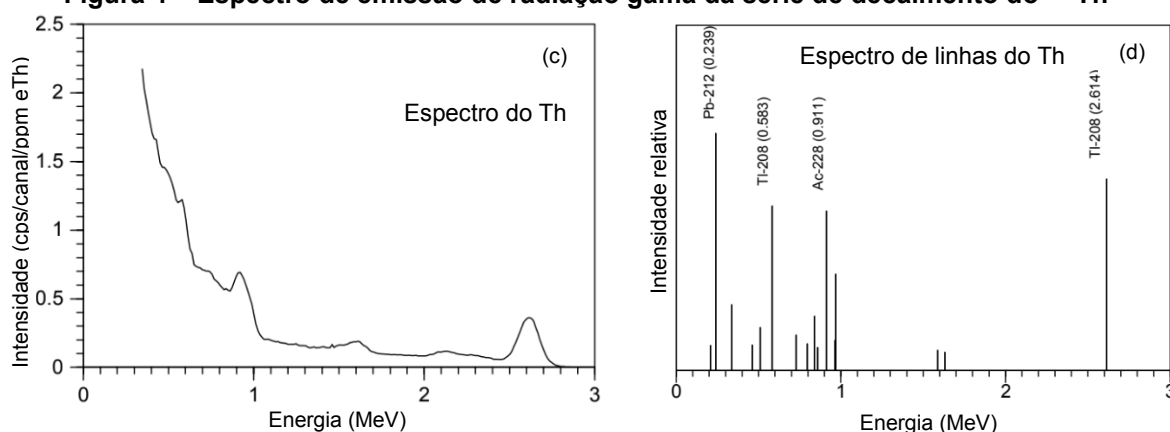
Nas figuras 3 e 4 estão expressas as linhas teóricas espectrais de emissão gama (b, d) combinadas com o espectro real coletado a partir de fontes radioativas dos radioisótopos primordiais durante uma simulação (a, c). Os espectros reais são manchados por atenuações geradas na interação da radiação com o meio que separa o detector da fonte, contudo, preservam os fotopicos característicos de cada cadeia radioativa (IAEA, 2003).

Figura 3 – Espectro de emissão de radiação gama da série de decaimento do ^{238}U



Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

Figura 4 – Espectro de emissão de radiação gama da série de decaimento do ^{232}Th



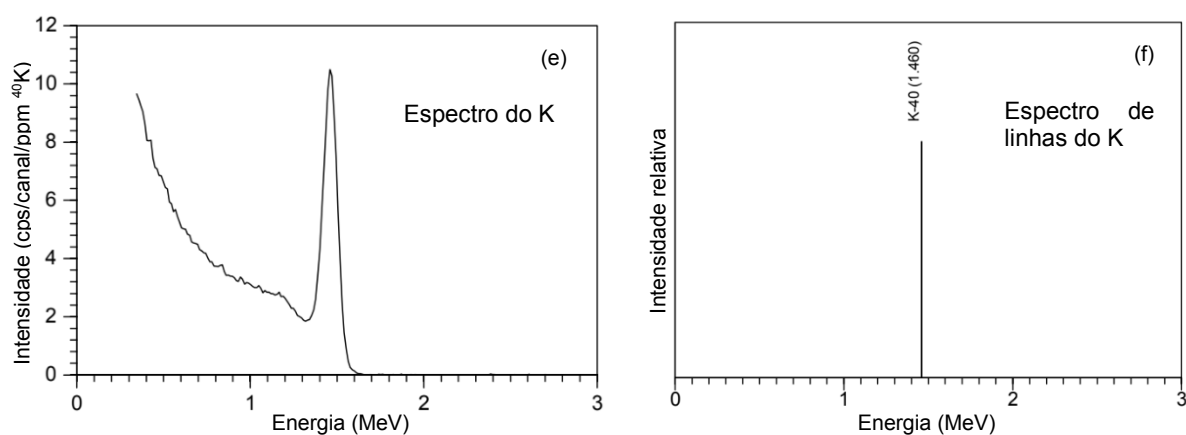
Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

De acordo com a UNSCEAR (2008), além dos isótopos gama-emissores presentes nas séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th (vide tabelas 1 e 2), outro isótopo naturalmente ativo que carece de monitoramento é o ^{40}K , visto que é um dos principais contribuintes para a dose anual absorvida pelo ser humano devido a fontes naturais de radiação.

Por possuir um único pico de emissão gama com energia bem definida (1,460 MeV), o ^{40}K também é utilizado como fonte de calibração de detectores (ATOMTEX, 2018).

Na figura 5 está ilustrado um conjunto de espectros semelhantes aos exibidos nas figuras 3 e 4, porém relativos à transmutação de ^{40}K em ^{40}Ar por meio da emissão de fótons gama.

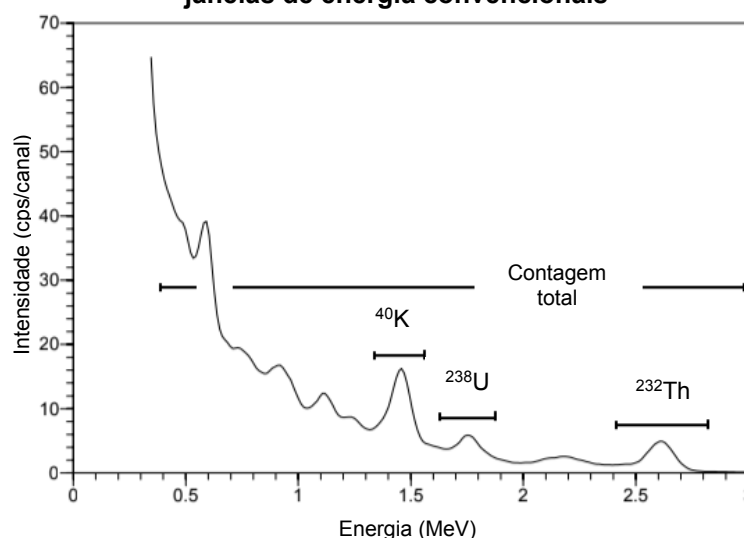
Figura 5 – Espectro da radiação gama emitida durante a transmutação de ^{40}K em ^{40}Ar



Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

Portanto, o monitoramento ambiental é realizado a partir da distinção de janelas de energia, dentro das quais deve ser considerada a resolução de energia do detector. Na figura 6 está exibido um espectro típico coletado por aerogamaespectrometria com um cintilador de NaI (TI). As faixas convencionais de energia recomendadas pela IAEA (1991) para identificação dos radionuclídeos primordiais estão dispostas na tabela 3.

Figura 6 – Espectro típico de raios gama transportados pelo ar exibindo as posições das janelas de energia convencionais



Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

Tabela 3 – Janelas de energia de raios gama recomendadas para mapeamento de radioelementos naturais (IAEA, 1991)

Janela	Nuclídeo	Faixas de energia (MeV)
Contagem total	-	0,400 – 2,810
Potássio	^{40}K (1,460 MeV)	1,370 – 1570
Urânio	^{214}Bi (1,765 MeV)	1,660 – 1860
Tório	^{208}Tl (2,614 MeV)	2,410 – 2,810

Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

Uma aproximação para a modelagem matemática de campos de radiação gama foi proposta por Clark *et al.* (1972). Os autores consideraram um sistema com apenas duas interfaces de interação (Terra e ar), sendo a Terra um meio infinito, com densidade e concentração de radioisótopos constantes, sobrepostos por ar não radioativo, também de densidade constante. Desta maneira, um nuclídeo gama-emissor, que ocupa um elemento de volume (dV) localizado no interior da Terra, produz radiação gama monoenergética de magnitude (dI) dada por

$$dl = \frac{A\varepsilon}{4\pi R^2} e^{-\mu_e r_e} e^{-\mu_a r_a} NdV \quad (1)$$

Onde NdV = número de raios gama com energia E_0 emitidos por segundo pelo elemento de volume dV ;

A = área da seção transversal efetiva de um detector esférico;

ε = eficiência de fotopico do detector para raios gama de energia E_0 ;

μ_e, μ_a = coeficientes de atenuação linear para a Terra e o ar, respectivamente;

r_e, r_a = as espessuras das camadas de Terra e de ar através das quais os raios gama percorrem e ($R = r_e + r_a$).

A integração da equação 1 pode ser realizada para diferentes geometrias de fontes ativas, relacionando a resposta do fotopico com a intensidade da radiação coletada para uma configuração específica (IAEA, 2003).

2.1.3 Radônio

O Rn é um gás nobre instável que não possui cheiro, gosto e cor. Seus principais isótopos têm origem natural nas cadeias de decaimento do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th e podem ser encontrados em diversos compartimentos do ecossistema (vide figura 1). Na tabela 4, estão dispostos os dados de meia-vida, origem e energia de emissão alfa dos isótopos de radônio.

Tabela 4 – Características gerais dos isótopos de Rn

Isótopo	Nuclídeo primordial (origem)	Tempo de meia-vida	Energia da emissão α
^{222}Rn (radônio)	^{238}U	3,8232 d	5590,3 KeV
^{220}Rn (torônio)	^{232}Th	55,8 s	6404,67 KeV
^{219}Rn (actinônio)	^{235}U	3,98 s	6946,1 KeV

Fonte: Adaptado de Laboratoire National Henri Becquerel (2010)

As partículas α emitidas pelos isótopos de Rn são massivas e possuem um baixo poder de penetração, sendo barradas pela pele humana com facilidade. Entretanto, o RnD podem ser carregados para dentro dos tratos respiratório e digestório humanos pela inalação e ingestão, fato que acarreta em uma significativa exposição interna às partículas α (GRZYWA-CELIŃSKA *et al.*, 2020).

Por ser um gás quimicamente inerte, o Rn não interage diretamente com o corpo humano, contudo, deposita seus filhos de meia-vida curta em órgãos como o pulmão e o estômago, podendo ionizar e causar danos ao DNA das células destes tecidos.

A exposição prolongada ao ^{222}Rn e ao ^{220}Rn tem sido associada ao aumento da probabilidade do desenvolvimento de tumores malignos em humanos desde a década de 1970, quando casos de morte por câncer de pulmão em trabalhadores de minas de urânio passaram a ser estudados por órgãos internacionais (UNSCEAR, 1977; UNSCEAR, 1982; UNSCEAR, 2006).

No tempo presente, é consenso científico a relação direta entre a exposição contínua ao Rn e o desenvolvimento de câncer, a qual é potencializada para indivíduos fumantes (ICRP 2014; UNSCEAR 2019; WHO, 2023).

Segundo dados da Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (EPA-US, 2024), os efeitos sinérgicos da exposição ao Rn e ao tabagismo causam câncer de pulmão em 62 pessoas a cada 1000. Este número abaixa para 7,3 em cada 1000 para indivíduos que nunca fumaram.

Além disso, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (2023), estima-se que o Rn seja responsável entre 3% e 14% do número total de cânceres de pulmão em

um determinado país, a depender da taxa de tabagismo nacional e dos níveis médios de Rn daquele território.

Devido à dependência temporal entre a exposição e o desenvolvimento de câncer, os trabalhos científicos possuem foco no estudo dos isótopos ^{222}Rn e ^{220}Rn .

2.1.3.1 Radônio nas rochas e no solo

Radionuclídeos de ocorrência natural estão presentes na crosta terrestre desde a formação do sistema solar, sendo as rochas o ponto de partida para a transferência destes elementos aos diversos compartimentos do ecossistema (JACOMINO, 2016).

Rochas de composição mineralógica, como o quartzo, não apresentam altos teores de U, Th e ^{40}K . Por outro lado, rochas compostas por minerais acessórios, como o zircão e a monazita, já exibem concentração relativamente expressiva dos nuclídeos primordiais (JACOMINO, 2016).

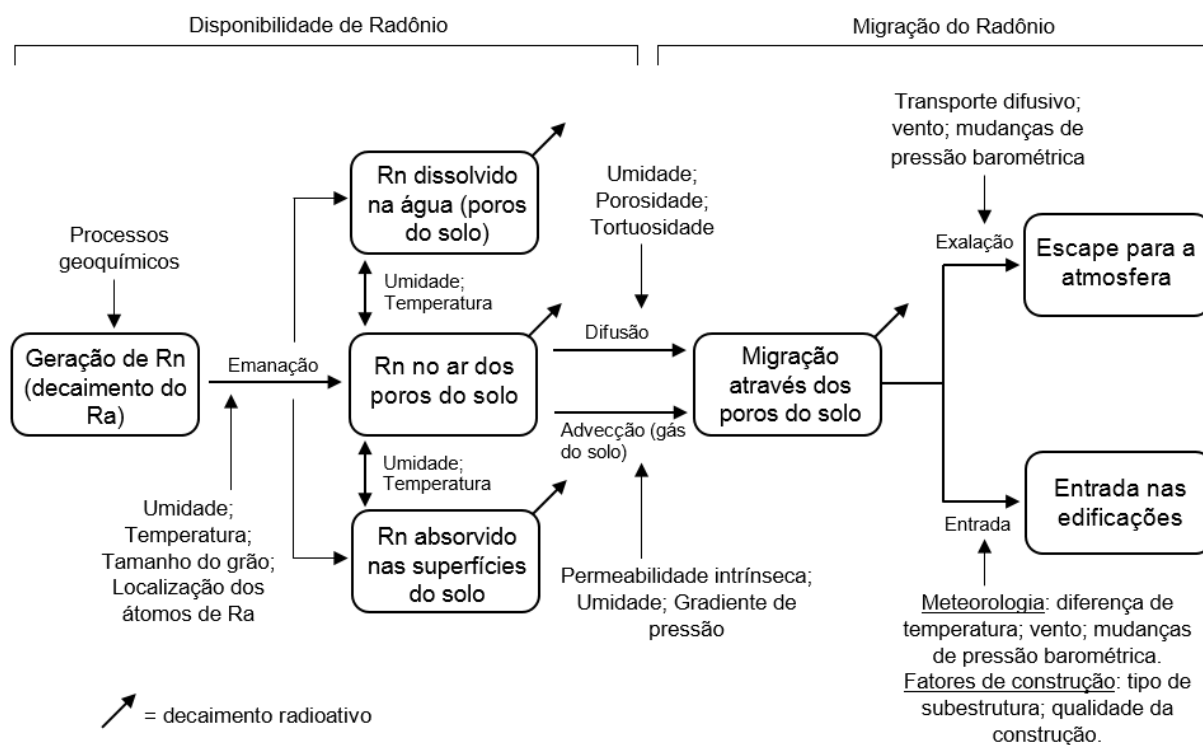
Contudo, as rochas ígneas, formadas pela cristalização do magma, são o grupo que apresentam os maiores valores de concentração dos isótopos ativos. Dentre elas, a família dos granitoides requer atenção científica, tanto por possuir alto valor econômico agregado, quanto por representar uma importante via de exposição humana quando incorporadas em ambientes residenciais (JACOMINO, 2016).

Outro significativo canal de exposição humana derivado das rochas são os materiais de construção civil. Rochas com altas concentrações de Ra usadas para a construção em alvenaria emanam para o ar dentro dos ambientes de convívio isótopos de Rn, os quais podem permanecer longos períodos no ar, a depender da ventilação local. Regiões com temperaturas baixas tendem a aumentar esta exposição, uma vez que a taxa de troca do ar interno com o externo é menor (JONES, 1999).

Em relação ao solo, as concentrações iniciais de Ra e Rn influenciam diretamente outros compartimentos do ecossistema, como o ar do solo, as águas subterrâneas e a atmosfera. No tocante à exposição humana, a contribuição preponderante advém da entrada de Rn no ar de edificações construídas diretamente sobre solos ricos em nuclídeos primordiais.

Na Figura 7, estão expressos os principais elementos de geração e transporte de Rn envolvendo o solo.

Figura 7 – Representação da geração e transporte de Rn no solo e sua entrada no ar



Fonte: Adaptado de Nazaroff (1992)

As caixas exibem as fases principais através das quais a concentração de rádio no solo favorece a dispersão do radônio no ar. As setas horizontais indicam os processos de transição de uma fase para a outra. Nas setas verticais estão dispostas as variáveis que interferem nos processos entre as fases.

O primeiro grupo de caixas contém os fatores que determinam a concentração de Rn no ar do solo. O segundo grupo, contém os fatores que regem o transporte do Rn do ar do solo para a atmosfera. Uma alta disponibilidade de Rn ou uma alta taxa de migração do Rn em um determinado solo caracteriza-o como uma significativa fonte de exposição.

A modelagem da entrada de Rn nas edificações considera parâmetros tanto do solo (homogeneidade, isotropia, coeficiente de emanção do Rn, etc.) quanto da construção (tipo de subestrutura, rachaduras, etc.). Os parâmetros completos foram listados por NAZAROFF (1992).

Uma variável crucial na contabilização do Rn no ar das habitações é a concentração de Ra superficial no solo. Quantitativamente, uma concentração de Ra de 1 Bq/kg no solo origina uma taxa total de produção de Rn de um átomo/kg a cada

segundo, correspondendo à 0,0076 Bq/kg a cada hora para o ^{222}Rn ou 45 Bq/kg a cada hora para o ^{220}Rn (NAZAROFF, 1992).

Nesta perspectiva, o mapeamento superficial de áreas habitadas é essencial para a localização de pontos com alta concentração de elementos pertencentes às cadeias primordiais, como os isótopos de Ra. Edificações sobre solos ricos em U e Th tendem a exibir concentrações elevadas de Rn no ar interno e externo.

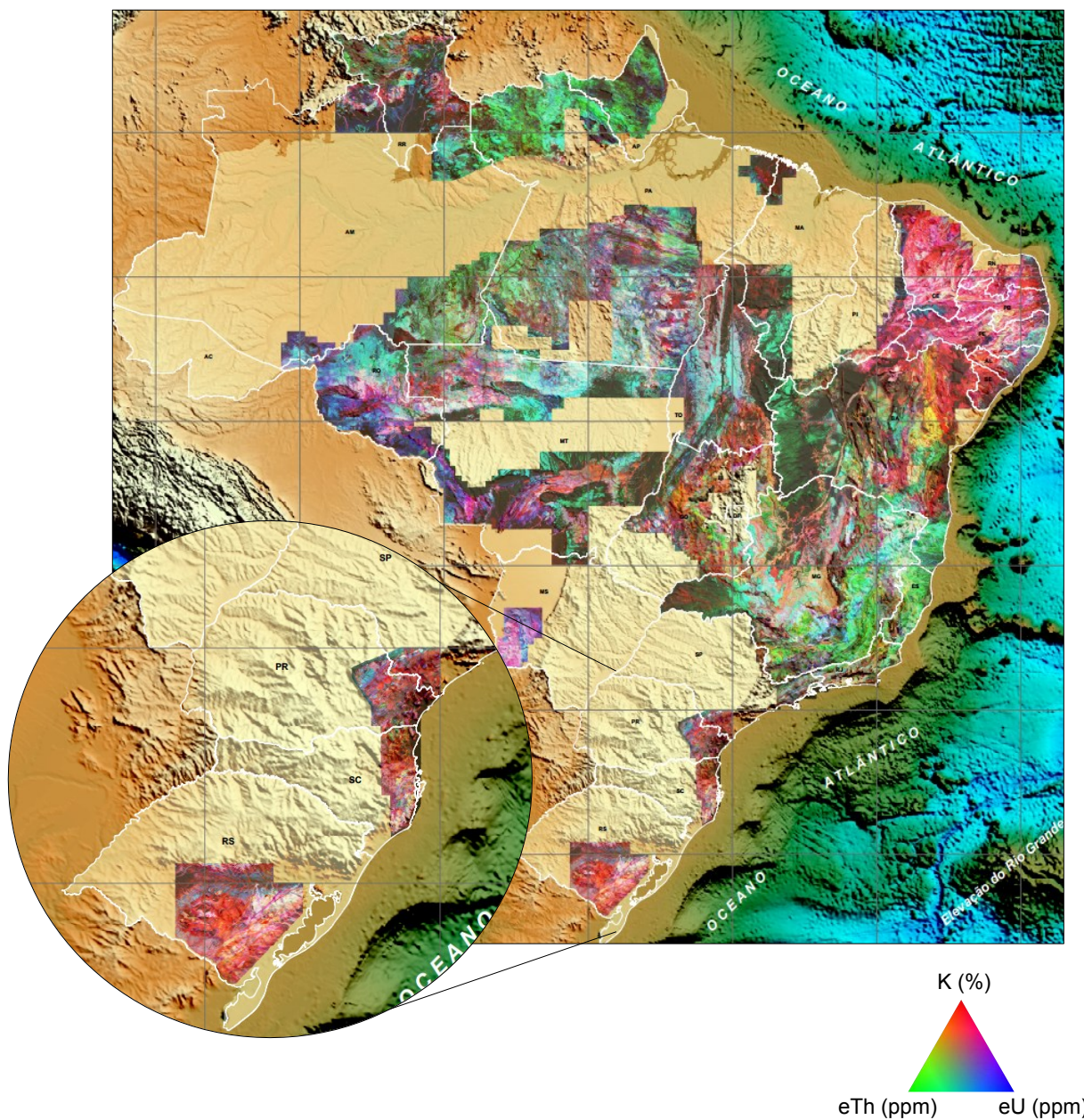
Para isso, a aerogamaespectrometria (escala regional) e a espectrometria por caminhamento podem ser realizadas seguindo os protocolos estabelecidos pela IAEA e listados nas sessões anteriores deste trabalho.

O projeto de mapeamento radiométrico do território brasileiro desenvolvido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SGB-CPRM), empresa governamental vinculada ao Ministério de Minas e Energia, compilou dados aerogeofísicos adquiridos ao longo das duas últimas décadas em parcerias do governo federal com os governos estaduais. O resultado foi publicado por Correa (2019) e está exibido na Figura 8, com destaque para a região sul.

No mapa, foi utilizada como legenda a composição ternária RGB (K-eTh-eU), na qual a cor vermelha representa o elemento K [%], a cor verde representa o eTh [ppm] e a cor azul representa o eU [ppm]. O gradiente de cores também tem significado. Por exemplo, a cor rosa representa a presença proporcional de K e eU e a ausência de eTh. Já a cor alaranjada aponta a presença proporcional de K e eTh e ausência de eU. O espectro varia do preto (ausência dos três elementos) até o branco (presença na mesma proporção dos três elementos).

Este projeto recobriu cerca de 93% do território brasileiro. A imagem de composição ternária exibe tanto os escudos com alta concentração dos isótopos primordiais quanto os escudos com concentração relativamente baixa (regiões sem preenchimento).

A APA do Rio Passaúna está localizada dentro do escudo mapeado, na porção sudeste do estado do Paraná e apresenta concentração expressiva dos NORMs.

Figura 8 – Mapa radiométrico brasileiro (SGB-CPRM)

Fonte: Adaptado de Correa (2019)

A aquisição de dados espectrométricos *in situ* deste trabalho foi realizada na APA do Rio Passaúna, área compreendida dentro da porção já analisada pelo projeto do CPRM no estado do Paraná. Na seção dos resultados, são discutidos os dados obtidos pelas espectrometrias por caminhamento e aérea.

2.1.3.2 Radônio nas águas subterrâneas

O Rn é um gás solúvel em água, logo, pode ser incorporado ao fluxo de águas subterrâneas. Características geológicas das redes por onde as águas fluem afetam diretamente a concentração de Rn em aquíferos. Em consonância, a interação água-rocha, o tempo de residência da água no aquífero e o nível nominal de Ra no sistema também influenciam esta concentração (ALONSO *et al.*, 2015).

De maneira geral, as concentrações de Rn são menores em águas superficiais, intermediárias em águas subterrâneas e elevadas em águas de poços. Os valores de referência fornecidos pela Unscear para as concentrações médias de Rn nas respectivas águas são de 1 Bq/L, 10 Bq/L e 100 Bq/L (MORENO *et al.*, 2018). Esses valores são heterogêneos e flutuam de acordo com a agência reguladora.

Segundo Bonotto (2004, p.105), os mecanismos que influenciam a liberação do Rn de fragmentos de rocha para as águas subterrâneas são:

- (1) Recuo do Rn após o decaimento alfa dos átomos de Ra próximos da superfície da rocha, sendo a distância de recuo do ^{222}Rn correspondente a $0,036 \mu\text{m}$;
- (2) Difusão do Rn através do retículo cristalino, a partir dos locais de produção não localizados na superfície da rocha;
- (3) Difusão do Rn ao longo de defeitos cristalinos, contornos de grãos ou microfaturas, a partir de posições distantes da superfície da rocha.

Os modelos de geração de ^{222}Rn nas rochas e sua dispersão para as águas subterrâneas apresentados por Bonotto (2004) consideram uma abordagem macroscópica do fenômeno, visto que algumas variáveis microscópicas (como a distribuição não-homogênea de ^{226}Ra no sólido) são de difícil mensuração. A avaliação do teor de ^{222}Rn em águas a partir do teor de ^{238}U nas rochas pode ser realizada por meio das equações reunidas no quadro 1.

A derivação destas equações considera os elementos pertencentes à cadeia de decaimento do ^{238}U em equilíbrio secular no sistema rocha-água.

O parâmetro E contabiliza a eficiência de emanção da rocha em relação à dispersão de Rn para a água e é expresso matematicamente por

$$E = \frac{(^{222}\text{Rn}) \text{ água}}{(^{222}\text{Rn}) \text{ água} + (^{222}\text{Rn}) \text{ rocha}} \quad (2)$$

Esta representação foi cunhada por Wanty *et al.* (1992). O fator $E = F = A$, variando apenas a representação de acordo com o autor.

Quadro 1 – Modelos matemáticos de concentração de ^{222}Rn em águas subterrâneas a partir da concentração de ^{238}U nas rochas

Nº	Equação	Autor	Parâmetros	
			Definição	Unidade
(3)	$[Rn] = 0,33A\rho\phi^{-1}[U](1 - e^{-\lambda tr})$	Andrews e Lee (1979)	[Rn] = teor de ^{222}Rn na água [U] = teor de U na rocha matriz ρ = densidade da rocha matriz A = eficiência fracional da liberação de ^{222}Rn λ = constante de decaimento do ^{222}Rn tr = tempo de residência da água subterrânea ϕ = porosidade fracional	pCi cm ⁻³ µg/g g cm ⁻³ adimensional dia ⁻¹ dia adimensional
(4)	$[Rn] = \frac{0,7336A\rho[U]10^3}{2,2x10^6\phi}$	Andrews et al. (1982)	[Rn] = idem eq. (3) A, ρ , [U], ϕ = idem eq. (3)	µCiKg ⁻¹ idem eq. (3)
(5)	$[Rn] = \frac{0,7336F\rho[U]10^3}{2,2x10^6\phi}$	Andrews (1983)	[Rn] = idem eq. (3) F = A = idem eq. (3) [U], ρ , ϕ = idem eq. (3)	Idem eq. (4) idem eq. (3) idem eq. (3)
(6)	$[Rn] = 337\rho E[U]\left(\frac{1 - \phi}{\phi}\right)$	Wanty et al. (1992)	[Rn] = idem eq. (3) E = A = idem eq. (3) [U], ϕ = idem eq. (3) ρ = idem eq. (3)	pCi/l idem eq. (3) idem eq. (3) kg/l

Fonte: Bonotto (2004)

As equações 4 e 5 são idênticas e diferem da equação 3 apenas pelas unidades empregadas e pelo termo $(1 - e^{-\lambda tr})$. Este termo tende a unidade quando o parâmetro tr é maior que 25 dias. Já a equação 6 é distinta da equação 3 nas unidades e no termo $(1 - \phi)$, o qual tende a unidade para rochas com porosidade baixa. Portanto, as equações exibidas no quadro 1 são equivalentes (BONOTTO, 2004).

No Brasil, o abastecimento de água da população acontece por três vias principais: a) amplos sistemas de abastecimento com redes concessionadas; b) sistemas coletivos alternativos, com captação de águas superficiais e subterrâneas; c) sistema pessoal, com captação de águas subterrâneas por meio de poços artesianos e semi artesianos (WHO, 2018).

Em áreas rurais, a prevalência do abastecimento é do sistema individual, com manuseio de águas de poços (WHO, 2018).

A ingestão direta de água contaminada representa um importante canal de risco à população. Entretanto, cerca de 90% da dose atribuível à exposição ao Rn na água resulta da inalação do Rn liberado no ar interno de residências durante aquecimento ou agitação da referida água (AL-ZOUGHOOL; KREWSKI, 2009; UNSCEAR, 2020).

2.1.3.3 Radônio no ar

A partir do exposto, a problemática da exposição humana ao Rn recai majoritariamente na inalação deste gás. No tocante às rochas, a questão se reduz à geração e transferência de Rn para o ar interno de residências, seja por meio de materiais de construção civil empregados na alvenaria, seja por granitos incorporados na decoração de interiores.

A parcela associada ao solo refere-se à migração de Rn para o ar interno das habitações ou à geração de particulados contaminados.

Em relação às águas subterrâneas enriquecidas em U ou eU, liberam Rn para o ar quando aquecidas (durante o banho, por exemplo) ou agitadas (durante a lavagem da louça e roupa).

Na figura 9 estão compiladas algumas vias de entrada e acúmulo de Rn no ar interno de residências.

Figura 9 – Vias de entrada e acúmulo de ^{222}Rn em residências



Fonte: Radon1 (2019)

A presença de Rn no trato respiratório ocasiona a irradiação do epitélio bronquial com partículas α provenientes dos seus produtos de decaimento (vide tabela 1). Esta exposição contínua tem sido associada não apenas ao desenvolvimento de câncer de pulmão, mas também à leucemia mieloide aguda e leucemia linfoblástica aguda (JONES, 1999).

A disposição de Rn em ambientes fechados é melhor modelada por uma distribuição log-normal na maioria dos países, a depender dos estratos geológicos subjacentes. Desta maneira, as concentrações de Rn se aglomeram em faixas menores, fato que indica que a maior parte dos casos de tumores malignos oriundos da exposição prolongada ao Rn em ambientes internos se desenvolvem a partir de concentrações baixas e moderadas do gás (OMS, 2016).

Nesse sentido, há recomendação dos órgãos de radioproteção nacionais e internacionais para o monitoramento do Rn nos diversos compartimentos do ecossistema.

2.1.3.4 Detecção dos isótopos de radônio

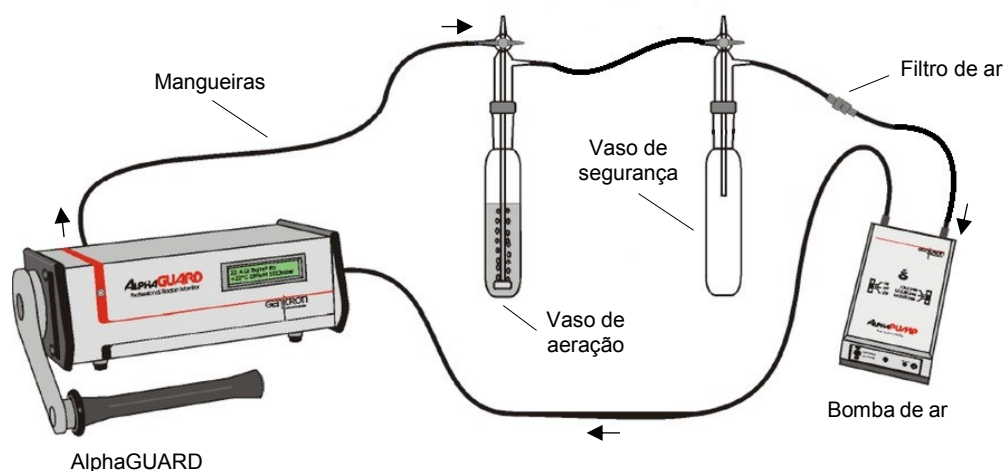
O equipamento AlphaGUARD PQ2000 PRO (*Saphymo*, atual *Bertin Technologies*) é um detector a gás, do tipo câmara de ionização, com arranjos específicos para espectroscopia de partículas α . Consiste em relacionar a energia da radiação ionizante com os pulsos gerados na câmara.

O processamento digital do sinal é realizado por um sistema microcontrolador com três canais independentes de aquisição e processamento. O resultado da análise dos pulsos permite identificar a) altura do pulso (relação com a energia da partícula alfa); b) número de pulsos por unidade de tempo; c) classes de formas de pulso.

Possui uma bomba de sucção de ar acoplada que cria um fluxo contínuo e homogêneo de gás pelo sistema bomba-mangueiras-câmara. A partir deste fluxo, é possível medir a concentração de Rn no ar de solos. Outra aplicação comum é a medição da concentração de Rn dissolvido em amostras de água por meio da aeração.

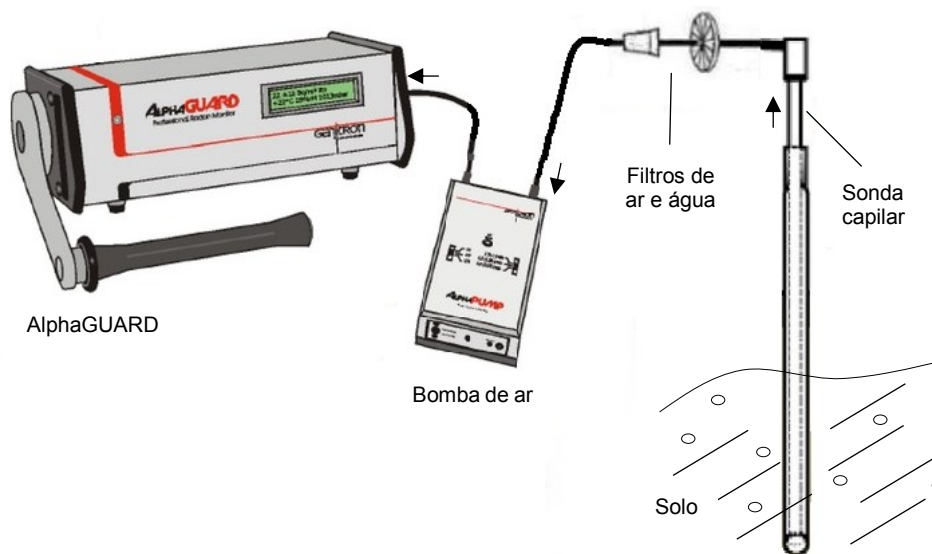
Nas figuras 10 e 11 estão exibidos os arranjos experimentais característicos para medições de Rn em água e solo, respectivamente.

Figura 10 – AlphaGUARD acoplado ao AlphaKIT para medição de ^{222}Rn em amostras de água



Fonte: Adaptado de Genitron Instruments (1998)

Figura 11 – AlphaGUARD acoplado à sonda para medição de ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo



Fonte: Adaptado de Genitron Instruments (1998)

Para medições de Rn em água, é utilizado um circuito fechado. A bomba de sucção circula o ar do sistema até chegar no vaso de aerção, local que uma amostra de 100 ml de água é aerada e libera o Rn dissolvido para o ar do sistema. Na sequência, este ar contaminado é levado para a câmara de ionização, onde os decaimentos α são contabilizados. O vaso de segurança é inserido no sistema para proteção dos equipamentos em caso de vazamento de água.

Por fim, é necessário corrigir o valor de concentração fornecido pelo equipamento através da equação 7, uma vez que esta concentração é referente apenas à amostra de 100 ml de água.

$$C_{\text{água}} = \frac{C_{\text{ar}} \left(\frac{V_{\text{sistema}} - V_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} + K \right) - C_{\text{bg}}}{1000} \quad (7)$$

Onde $C_{\text{água}}$ = concentração de Rn na água analisada, em Bq/L;

C_{ar} = concentração de Rn fornecida pelo equipamento para a amostra de água aerada, em Bq/m³;

C_{bg} = concentração de Rn de fundo (*background*), em Bq/m³;

V_{sistema} = volume total do sistema bomba-mangueiras-câmara-vasos, em ml;

V_{amostra} = volume de água colocado no vaso de aeração (100 ml por recomendação do fabricante), em ml;

K é o coeficiente de partição, o qual considera a temperatura na qual a medição ocorreu. De acordo com o manual do usuário, o cálculo deste coeficiente deve ser realizado a partir da formulação de Clever (1985), exibida na equação 8.

$$K = 0,105 + 0,405e^{-0,502 \cdot T (^{\circ}C)} \quad (8)$$

Para medições de Rn no ar do solo, é utilizado um sistema aberto. A bomba suga o ar do solo potencialmente contaminado e o insere na câmara de ionização para a contabilização dos decaimentos α . A sucção é realizada por meio de uma sonda com um metro de comprimento, a qual deve atingir uma profundidade mínima de 80 cm no solo. O sistema é equipado com filtros de água e poeira.

Modelos de separação da atividade de ²²²Rn e ²²⁰Rn no ar do solo são discutidos na seção seguinte.

2.1.3.5 Modelos matemáticos para análise quantitativa de Rn, Tn e Ra

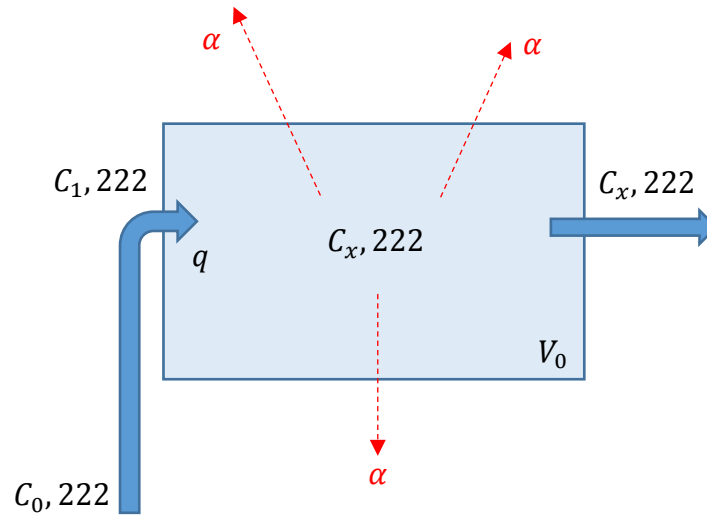
2.1.3.5.1 *AlphaGUARD em medições do ar do solo*

O modelo apresentado nesta seção considera três fenômenos físicos principais no processo de detecção de Rn no ar do solo: a ingestão de Rn no sistema do equipamento; a liberação deste ar para a atmosfera (sistema aberto) após o

processo de medição; decaimento radioativo do Rn e seus filhos na câmara de ionização (PASCHUK *et al.*, 2015).

A figura 12 exibe a esquematização do problema descrito.

Figura 12 – Esquema da medição de Rn no ar do solo



Fonte: Adaptado de Paschuk *et al.* (2015)

$C_{0,222}$ representa a concentração inicial de ^{222}Rn no solo, q representa o fluxo de ar gerado pela bomba de sucção, $C_{1,222}$ representa a concentração de ^{222}Rn injetado na câmara de ionização considerando o tempo de transporte do ar do solo para o equipamento, passando pela sonda e pelas mangueiras. Após a mistura do ar do solo com o ar de volume V_0 já presente na cavidade, atinge-se o nível de detecção $C_{x,222}$ para o isótopo de ^{222}Rn .

A descrição matemática destes fenômenos é feita por meio da equação diferencial 9 (PASCHUK *et al.*, 2015).

$$dC_x = \frac{C_1 q}{\lambda} - \lambda C_x dt - \frac{C_x}{V_0} q dt \quad (9)$$

A integração da equação 9 fornece a concentração total $C_{x,222}$.

$$C_{x,222}(t) = - \frac{\left(-1 + e^{\frac{t(-q\lambda - \lambda^2 V_0)}{\lambda V_0}} \right) q C_1 V_0}{\lambda(q + \lambda V_0)} \quad (10)$$

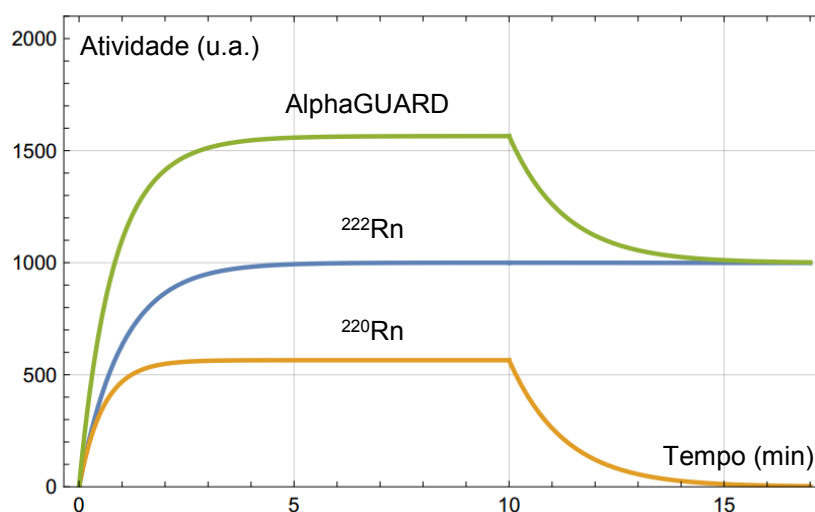
Caso o isótopo medido seja o ^{220}Rn , as equações 9 e 10 continuam válidas e devem ser corrigidos apenas os parâmetros de constante de decaimento λ e concentrações inicial $C_{1, 220}$ e final $C_{x, 220}$.

Entretanto, normalmente são detectados os isótopos de ^{222}Rn e ^{220}Rn simultaneamente, devido à presença tanto de ^{238}U quanto de ^{232}Th no solo analisado. Logo, a concentração C_x contabiliza as atividades de ^{222}Rn e ^{220}Rn somadas.

Para distinguir tais atividades, é recomendado um procedimento experimental adicional: ligar a bomba de sucção (5 minutos), proceder a medição (5-10 minutos) e continuar a medição com a bomba desligada (7 minutos). Durante a medição com a bomba desligada, o isótopo ^{220}Rn sofre desintegração α e tende a desaparecer em 7 minutos, visto que seu tempo de meia-vida é pequeno (55,8 segundos). Contudo, a concentração de ^{222}Rn não se altera, pelo fato do seu tempo de meia-vida ser muito superior (3,8 dias).

A figura 13 exibe os gráficos de concentração de ^{220}Rn , ^{222}Rn e suas concentrações somadas obtidos durante uma simulação.

Figura 13 – Representação da medição dos isótopos de ^{222}Rn e ^{220}Rn pelo AlphaGUARD



Fonte: Adaptado de Paschuk *et al.* (2015)

É possível visualizar que durante os primeiros 5 minutos acontece a mistura do ar do solo com o ar presente no interior do sistema. Na sequência, entre 5 e 10 minutos acontece a medição das concentrações somadas durante um regime permanente de fluxo de ar. No instante de tempo igual a 10 minutos, quando hipoteticamente a bomba foi desligada, inicia-se o decaimento do torônio na cavidade, restando apenas radônio ao fim do processo (17 minutos).

No modelo matemático, é necessário inserir na equação 10 um fator exponencial referente aos decaimentos dos isótopos de Rn com a bomba desligada. Este fator é muito próximo da unidade no caso do ^{222}Rn , uma vez que sua constante de decaimento é

$$\lambda_{222} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}(\text{min})} = \frac{\ln 2}{5505,4} \cong 0,000126 \text{ min}^{-1}$$

Já para o isótopo ^{220}Rn , este fator é significativo, pois

$$\lambda_{220} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}(\text{min})} = \frac{\ln 2}{0,93} \cong 0,745 \text{ min}^{-1}$$

Por fim, a equação 11 exhibe a modelagem completa do processo de medição.

$$C_x(t) = \frac{\left(1 - e^{-\frac{10(q\lambda_{222}V_0)}{V_0}}\right) qC_{1,222}}{(q + \lambda_{222}V_0)} e^{[-(t-10)\lambda_{222}]} + \frac{\left(1 - e^{-\frac{10(q\lambda_{220}V_0)}{V_0}}\right) qC_{1,220}}{(q + \lambda_{220}V_0)} e^{[-(t-10)\lambda_{220}]} \quad (11)$$

Na figura 13, a curva laranja foi construída com a segunda parcela da equação 11, contabilizando a contribuição da atividade de torônio. A curva azul remete à primeira parcela da equação 11, computando a atividade de radônio. A curva verde foi ajustada com a equação 11 completa, considerando as atividades somadas (atividade detectada pelo equipamento).

2.1.3.5.2 AlphaGUARD em medições de Rn e Ra na água

Uma cadeia de decaimentos sucessivos $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3 \dots$, com as respectivas constantes de decaimento $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ é descrita pelas equações lineares diferenciais acopladas (HEYDE, 1999):

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 ; \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \dots \quad (12)$$

A solução geral destas equações para coeficientes constantes é

$$N_1(t) = a_{11} e^{-\lambda_1 t}$$

$$\begin{aligned}
 N_2(t) &= a_{21}e^{-\lambda_1 t} + a_{22}e^{-\lambda_2 t} \\
 N_3(t) &= a_{31}e^{-\lambda_1 t} + a_{32}e^{-\lambda_2 t} + a_{33}e^{-\lambda_3 t} \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Com

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= N_1(t = 0) \\
 a_{21} &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} a_{11} \\
 a_{22} &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} a_{11} \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
 N_1(t) &= N_1 e^{-\lambda_1 t} \\
 N_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Como o Rn é filho do Ra, a modelagem acima se enquadra para os referidos elementos, sendo o Ra denominado pelo índice 1 e o Rn denominado pelo índice 2. Na configuração dos isótopos ^{226}Ra e ^{222}Rn , as constantes de decaimento são extremamente diferentes

$$\begin{aligned}
 \lambda_{226} &= \frac{\ln 2}{t_{1/2}(\text{dias})} = \frac{\ln 2}{583635} \cong 0,00000119 \text{ dia}^{-1} \\
 \lambda_{222} &= \frac{\ln 2}{t_{1/2}(\text{dias})} = \frac{\ln 2}{3,8232} \cong 0,18 \text{ dia}^{-1}
 \end{aligned}$$

Neste caso particular, $\lambda_{226} \ll \lambda_{222}$ e $\lambda_{226} \cong 0$. Substituindo essa informação na equação 15, obtém-se

$$\begin{aligned}
 N_{226}(t) &= N_{226}(t = 0) = \text{constante } e \\
 N_{222}(t) &= \frac{\lambda_{226} N_{226}}{\lambda_{222}} (1 - e^{-\lambda_{222} t})
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Em termos de atividade,

$$A_{226}(t) = A_{226}(t = 0) = \text{constante } e$$

$$A_{222}(t) = A_{226}(1 - e^{-\lambda_{222}t}) \quad (17)$$

Este caso particular é nomeado de equilíbrio secular, quando depois de uma situação transiente, as atividades dos elementos pai e filho se igualam. Tipicamente este regime acontece após 7 a 10 tempos de meia-vida do elemento filho.

Logo, medições da concentração de ^{222}Rn dissolvido em água realizadas aproximadamente 38 dias seguidos da coleta da amostra, exibem valores nominais indiretos da atividade de ^{226}Ra .

2.1.3.5.3 Detector de estado sólido (CR-39) em medições de Rn indoor

Os detectores de estado sólido de traços nucleares (do inglês: SSNTD – *solid state nuclear track detector*) registram o estrago físico causado por partículas alfa incidentes em um material radiosensível sob diversos ângulos.

A densidade de traços d [traços/cm²] gerados durante o período de exposição t [horas] pode ser relacionada com a concentração C [Bq/m³] de Rn no ar de ambientes fechados por meio da equação 18.

$$C = \frac{d}{ft} \quad (18)$$

Onde f [traços.cm⁻²/Bq.m⁻³.h] representa o fator de calibração do instrumento, o qual converte o número de traços em concentração.

O material polimérico radiosensível largamente utilizado para esta aplicação é o Poliálil Diglicol Carbonato, popularmente conhecido como CR-39.

Após a exposição, deve ser realizada uma corrosão química no detector com o intuito de aumentar os traços existentes e torná-los visíveis ao microscópio ótico. Este processo pode ser realizado com soluções alcalinas de hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio (OMS, 2016)

2.1.4 Regulamentações nacionais

A regulamentação internacional acerca dos valores limite e referência para radioisótopos naturais nos compartimentos do ecossistema são distintas, uma vez que consideram as particularidades geomorfológicas de cada território nacional.

Neste sentido, no Brasil, a regulamentação para a concentração de Rn no ar de ambientes internos segue a norma 3.01 CNEN, publicada no dia 18/05/2024, com nível de referência estipulado em 300 Bq/m³.

Por outro lado, a potabilidade radiológica de águas é baseada na portaria GM/MS N°888 e na posição regulatória 3.01/012 CNEN. De acordo com estes documentos, os valores de triagem para atividade alfa total em águas potáveis não devem exceder 0,5 Bq/L.

Caso este valor seja ultrapassado, devem ser determinadas as concentrações individuais dos isótopos de ²³⁸U, ²³⁵U, ²²⁶Ra, ²²⁴Ra, ²³²Th, ²²⁸Po e ²¹⁰Pb para posterior quantificação da estimativa da dose efetiva recebida pelo ser humano. Esta dose tem como valor de referência 0,1 mSv/ano.

No tocante aos solos, não existem regulamentações padrão para este compartimento, uma vez que inúmeros fatores podem influenciar a concentração de Rn no ar dos solos e sua emissão para os ambientes internos e externos. Na literatura, são encontradas concentrações de Rn com ordem de grandeza variando de dezenas a centenas de kBq/m³ (NEZNAL *et al.*, 1997). Segundo a UNSCEAR (2000), as concentrações médias mundiais de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K no solo são de 40 Bq/kg, 40 Bq/kg e 370 Bq/kg, respectivamente.

2.2 Estado da arte

O levantamento bibliográfico consiste na caracterização das publicações de uma determinada área do conhecimento. Por meio da bibliometria, é possível localizar dados estatísticos da produção científica (LIMA, 2017; GIL, 2002).

Para este trabalho, a busca e análise das publicações foi realizada na base de dados *Scopus*, ambiente virtual no qual foram investigados artigos, revisões, editoriais e publicações em conferência relacionados ao tema desta pesquisa.

A partir de dois descritores abrangentes (radônio e potássio 40), foram selecionadas novas palavras-chave fornecidas pela plataforma em consonância com as duas iniciais. O quadro 2 exibe as palavras-chave selecionadas, sua tradução para o inglês e seus similares utilizados no levantamento bibliográfico.

Quadro 2 – Definição dos descritores e similares

Tema	Descritor em inglês	Similares
<i>NORM</i>	<i>Radon</i>	<i>Radium, Uranium, Thorium</i>
<i>NORM</i>	<i>Potassium 40</i>	<i>Gamma radiation, Gamma spectrometry,</i>
Saúde humana	<i>Human Health</i>	<i>Lung cancer, Radiation exposure, Dose, Radiation monitoring</i>
Compartimento do ecossistema	<i>Water</i>	<i>Groundwater, Drinking water</i>
Compartimento do ecossistema	<i>Air</i>	<i>Air pollution</i>
Compartimento do ecossistema	<i>Soil</i>	<i>rock</i>

Fonte: Autoria própria (2024)

Na sequência, foi elaborado um caminho de busca na plataforma utilizando operadores Booleanos. O operador “AND” foi posicionado entre os descritores para que o resultado final abarcasse necessariamente os seis descritores definidos. O operador “OR” foi situado entre as palavras similares com o intuito de realizar uma pesquisa com maior abrangência.

A busca foi realizada para trabalhos que continham os descritores no título, no resumo ou nas palavras-chave. O quadro 3 explicita o caminho citado.

Quadro 3 – Caminho de busca com operadores Booleanos

(TITLE-ABS-KEY (radon OR radium OR uranium OR thorium) AND TITLE-ABS-KEY ("potassium 40" OR "gamma radiation" OR "gamma spectrometry") AND TITLE-ABS-KEY ("human health" OR "lung cancer" OR "radiation exposure" OR dose OR "radiation monitoring") AND TITLE-ABS-KEY (air OR "air pollution") AND TITLE-ABS-KEY (water OR groundwater OR "drinking water") AND TITLE-ABS-KEY (soil OR rock))

Fonte: Autoria própria (2024)

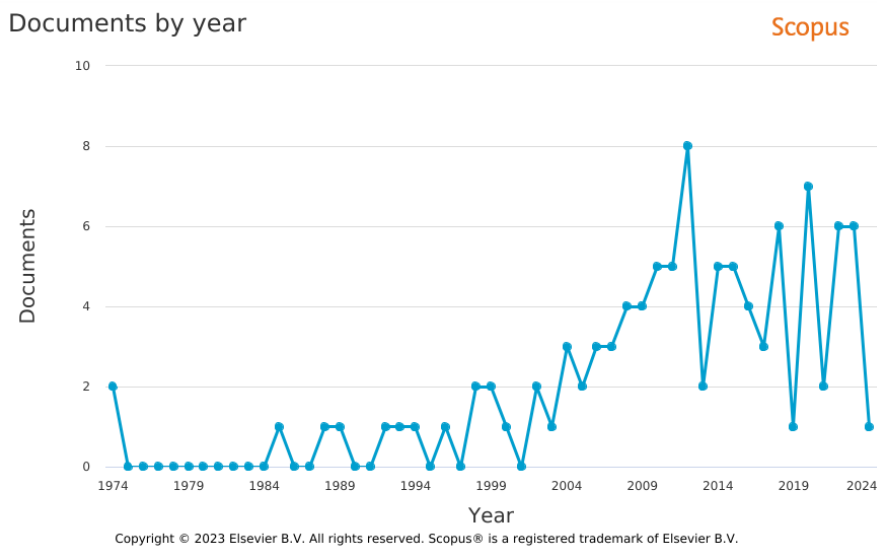
O refino da busca resultou em 102 documentos encontrados, sendo 96 artigos, 3 revisões, 2 publicações em conferência e 1 editorial publicados entre 1974 e 2024.

2.2.1 Análise bibliométrica

Por meio da ferramenta de análise de dados da própria plataforma *Scopus*, é possível observar a evolução temporal das publicações no tema delimitado. Tal evolução é explicitada na figura 14. Trabalhos científicos relacionados ao monitoramento radiométrico natural com ênfase no radônio datam da década de 1970,

época na qual o assunto ganhou relevância a partir dos casos de câncer de pulmão em trabalhadores de minas de Urânio.

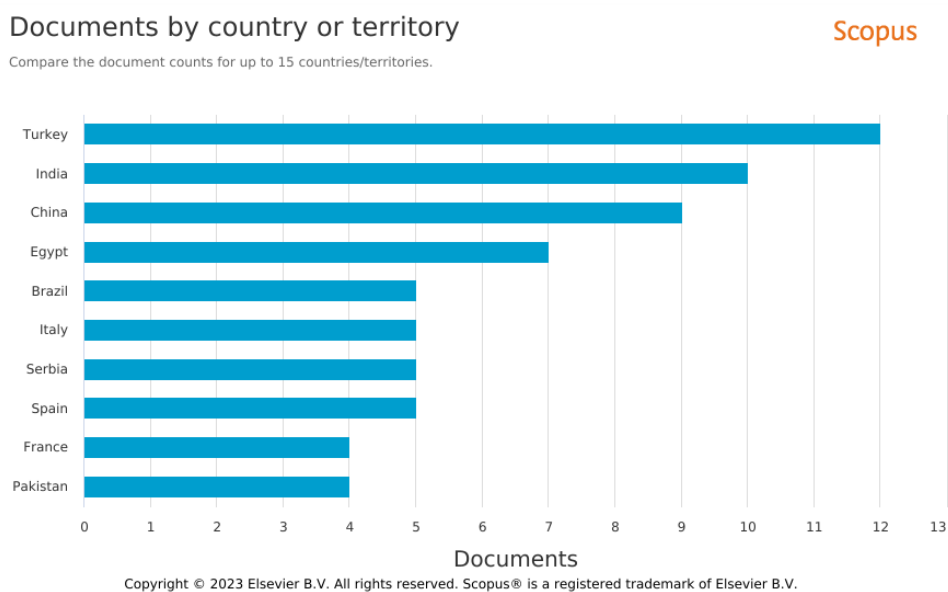
Figura 14 – Documentos publicados por ano



Fonte: Scopus (2024)

Em relação às publicações por território, observa-se o Brasil ocupando a quinta posição do ranking, o qual tem a Turquia no topo. A figura 15 exibe a configuração dos 10 países que possuem maior quantidade de publicações na área.

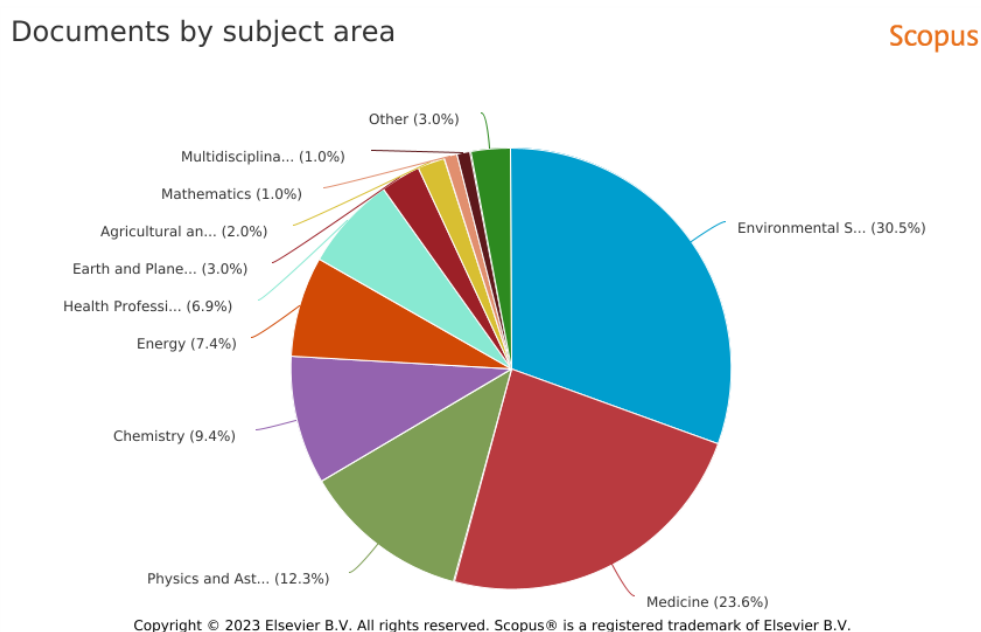
Figura 15 – Publicações por território



Fonte: Scopus (2024)

Outra métrica importante é a divisão das publicações por assunto. Além deste tema ter caráter multidisciplinar, o foco pode ser diverso de acordo com o escopo da pesquisa – saúde humana; proteção radiológica; mapeamento radiométrico; calibração de instrumentos de medição. Na figura 16 estão expressas as divisões das publicações por assunto. Observa-se que as áreas de ‘ciências ambientais’ e ‘medicina’ são responsáveis por mais da metade das publicações.

Figura 16 – Publicações por assunto



Fonte: Scopus (2024)

Por fim, foi realizada uma triagem nos trabalhos encontrados a fim de reunir as produções que possuem maior afinidade com o tema desta pesquisa. O resultado foi organizado no quadro 4 por ordem decrescente de data de publicação.

Quadro 4 – Publicações relacionadas ao tema desta pesquisa

Tema (Nº)	Título	Autores	Ano
Transferência de Rn das rochas para a água e para o ar (1)	<i>Distribution of radioelements in rock-water-air systems from the Caldas Novas hydrothermal complex (GO), Brazil</i>	Lunardi, M., Bonotto, D.M.	2023
Transferência de Rn da água para o ar de habitações (2)	<i>In-depth study of radon in water in a Greek village with enhanced radon concentrations</i>	Omirou, M., Clouvas, A., Leontaris, F., Kaissas, I.	2023
Radioatividade natural (3)	<i>Determination of the environmental natural radioactivity and mapping of natural background radioactivity of the Gumushane province, Turkey</i>	Kaya, S., Kaya, A., Çelik, N., Kara, R. T., Taşkın, H., Koz, B.	2020
Radioatividade	<i>Background radiation in the</i>	Chao, J.-H., Ting, C.-Y.,	2020

Natural (4)	<i>production area of hokutolite in Taiwan</i>	Huang, F.-Y.J., (...), Chin, C.-Y., Lin, C.-C.	
Radioatividade natural (5)	<i>Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa</i>	Madzunya, D., Dudu, V.P., Mathuthu, M., Manjoro, M.	2020
Radioatividade Natural (6)	<i>Radon concentration in water, soil and sediment of Hemavathi River environments</i>	Shivanandappa, K.C., Yerol, N.	2018
Radioatividade Natural (7)	<i>A review on variation of natural radioactivity along the southeast coast of Tamil Nadu for the Past 4 Decades (1974-2016)</i>	Sankaran Pillai, G., Chandrasekaran, S., Sivasubramanian, K., Baskaran, R., Venkatraman, B.	2018
Radioatividade natural e saúde pública (8)	<i>Investigation of natural radioactivity as a possible driver of cancer incidence in Paraiba, northeastern Brazil</i>	do Nascimento Santos, J.M., dos Santos Júnior, J.A., de Albuquerque Melo, A.M.M., (...), Damascena, K.F.R., da Silva Medeiros, N.V.	2018
Radioatividade natural e saúde pública (9)	<i>Natural radioactivity levels in soils, rocks and water at a mining concession of Perseus gold mine and surrounding towns in Central Region of Ghana</i>	Faanu, A., Adukpo, O.K., Tettey-Larbi, L., (...), Kpodzro, R., Agyeman, L.	2016
Radioatividade natural (10)	<i>Variation in the radon concentrations and outdoor gamma radiation levels in relation to different geological formations in the thermal regions of Bursa, Turkey</i>	Akkaya, G., Kahraman, A., Koray, A., Kaynak, G.	2016
Radioatividade natural (11)	<i>Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain</i>	Moreno, V., Bach, J., Baixeras, C., Font, L.	2014
Radioatividade natural (12)	<i>A study of environmental radioactivity measurements for Cankiri, Turkey</i>	Kapdan, E., Taskin, H., Kam, E., (...), Karahan, G., Bozkurt, A.	2012
Radioatividade natural (13)	<i>Assessment of natural radioactivity in Elaziğ region, eastern Turkey</i>	Canbazoğlu, C., Dođru, M., Çelebi, N., Kopuz, G.	2011
Radioatividade natural (14)	<i>On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: A case study in the Iberian Uranium Province</i>	Pereira, A.J.S.C., Godinho, M.M., Neves, L.J.P.F.	2010
Radioatividade natural (15)	<i>A study of background radioactivity level for Canakkale, Turkey</i>	Kam, E., Bozkurt, A., Ilgar, R.	2010
Radioatividade natural e mineração (16)	<i>Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana</i>	Darko, E.O., Faanu, A., Awudu, A.R., (...), Oppon, O.C., Akaho, E.H.K.	2009
Radioatividade natural e saúde pública (17)	<i>Background radiation, people and the environment: A review</i>	Ramachandran, T.V.	2008
Radioatividade natural (18)	<i>Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northern Turkey</i>	Kam, E., Bozkurt, A.	2007
Monitoramento de Rn e Ra (19)	<i>Determination of radon concentrations of the Dikili geothermal area in western Turkey</i>	Yarar, Y., Günaydi, T., Çelebi, N.	2006
Monitoramento de Rn e Ra (20)	<i>High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niška Banja (Balkan region)</i>	Žunić, Z.S., Kobal, I., Vaupotič, J., (...), Quarto, M., Bochicchio, F.	2006
Radioatividade	<i>Natural radioactivity levels in granitic</i>	Örgün, Y., Altinsoy, N.,	2005

natural (21)	<i>plutons and groundwaters in Southeast part of Eskisehir, Turkey</i>	Gültekin, A.H., Karahan, G., Çelebi, N.	
Radioatividade natural (22)	<i>Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico</i>	Colmenero Sujo, L., Montero Cabrera, M.E., Villalba, L., (...), Herrera Peraza, E.F., Sánchez Aroche, D.	2004
Radioatividade natural (23)	<i>Natural radiation environment in China</i>	Wang, Z.	2002
Monitoramento de Rn e Ra (24)	<i>Concentrations of indoor and soil radon in lithuania</i>	Gasiūnas, K., Mastauskas, A., Morkūnas, G.	1998
Monitoramento de Rn e Ra (25)	<i>Correlation among the terrestrial y radiation, the indoor air 222rn, and the tap water 222rn in Switzerland</i>	Buchli, R., Burkart, W.	1989

Fonte: Adaptado de Scopus (2024)

As publicações listadas apresentaram o levantamento radiométrico com ênfase em Rn e Ra nos diversos compartimentos do ecossistema, semelhante ao proposto neste trabalho. Apesar de existirem publicações desta natureza datadas da década de 1980, o monitoramento radiométrico continua em voga no tempo presente.

Dos 25 títulos selecionados, 8 apresentam regiões da Turquia como fonte de estudo, fato que corrobora com o dado apresentado na figura 15.

2.2.2 Discussão sobre as obras apresentadas

É consenso científico a dependência entre os valores de radiação natural e a formação geológica regional. Por esta razão, a comparação entre levantamentos radiométricos distintos é complexa e envolve variáveis geofísicas, climáticas, além de um conjunto de características culturais dos habitantes locais que influenciam o acúmulo de Rn *indoor*, por exemplo.

Neste sentido, foram observados aspectos metodológicos na produção acadêmica listada no quadro 4, bem como características comuns de cálculos dosimétricos e compartimentos de estudo.

Constatou-se que neste tipo de trabalho é comum a coleta de dados radiométricos em mais de um compartimento do ecossistema, como explícito nos trabalhos de Lunardi e Bonotto (2023), Kaya *et al.* (2020), Chao *et al.* (2020), Madzunya *et al.* (2020), Shivanandappa e Yerol (2018), Sankaran Pillai *et al.* (2018), Faanu *et al.* (2016), Akkaya *et al.* (2016), Moreno *et al.* (2014), Kapdan *et al.* (2012), Canbazoglu *et al.* (2011), Pereira, Godinho e Neves (2010), Kam, Bozkurt e Ilgar (2010), Darko *et al.* (2010), Ramachandran (2008), Kam, Bozkurt (2007), Yasar,

Günaydi e Çelebi (2006), Žunić *et al.* (2006), Örgün *et al.* (2005), Sujo *et al.* (2004), Wang (2002), Gasiūnas, Mastauskas e Morkūnas (1998), Buchli e Burkart (1989). Este padrão pode ser relacionado à forte interligação que o sistema rocha-solo-água possui na concentração e transferência de radionuclídeos na natureza.

No tocante à espectrometria gama, embora a metodologia de detecção não seja padronizada, são comumente utilizados cintiladores de NaI(Tl) e cristais semicondutores de germânio hiper puro (HPGe) como detectores principais, fato evidenciado nos trabalhos de Lunardi e Bonotto (2023), Omirou *et al.* (2023), Kaya *et al.* (2020), Chao *et al.* (2020), Madzunya *et al.* (2020), Santos *et al.* (2018), Faanu *et al.* (2016), Akkaya *et al.* (2016), Moreno *et al.* (2014), Kapdan *et al.* (2012), Pereira, Godinho e Neves (2010), Kam, Bozkurt e Ilgar (2010), Darko *et al.* (2010), Yarar, Günaydi e Çelebi (2006), Žunić *et al.* (2006), Örgün *et al.* (2005), Sujo *et al.* (2004). Tais detectores possuem alta resolução, com destaque para os semicondutores de germânio, que possibilitam medições abaixo de 20 KeV de energia. Trabalhos *in situ*, utilizam detectores portáteis com cintiladores (baixa resolução), enquanto pesquisas realizadas com ensaios laboratoriais preferencialmente utilizam HPGe (alta resolução).

Por outro lado, as medições de atividade alfa são realizadas de três maneiras distintas: pelo equipamento AlphaGUARD® (LUNARDI; BONOTTO, 2023; OMIROU *et al.*, 2023; AKKAYA *et al.*, 2016; PEREIRA; GODINHO; NEVES, 2010; ŽUNIĆ *et al.*, 2006); pelo equipamento RAD7® (LUNARDI; BONOTTO, 2023, SHIVANANDAPPA; YEROL, 2018; MORENO *et al.*, 2014); por cintiladores líquidos, plásticos ou detectores proporcionais, os quais necessitam de um tratamento químico prévio nas amostras de água (demais trabalhos).

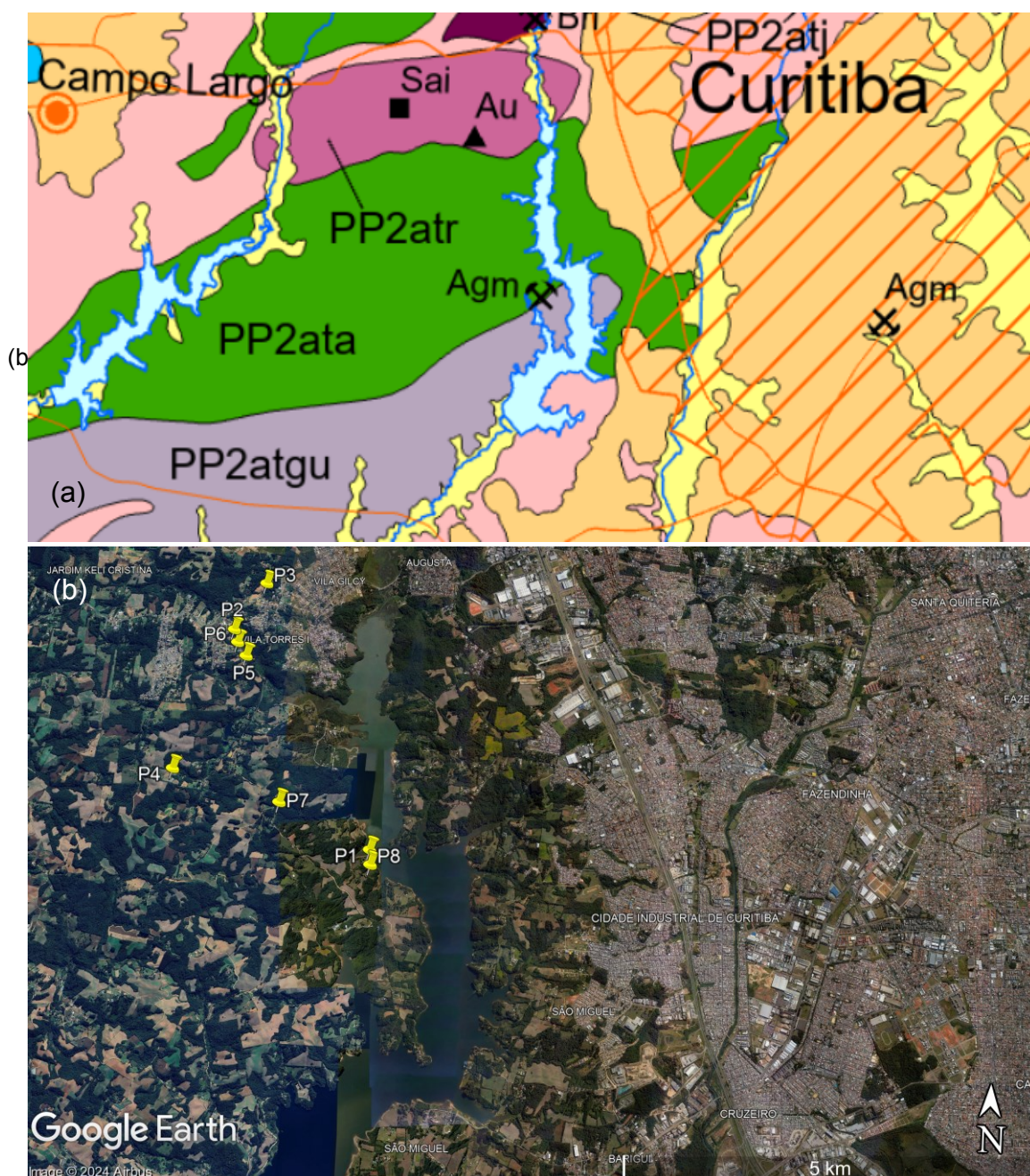
Ademais é possível identificar um esforço por parte dos autores (KAYA *et al.*, 2020; CHAO *et al.*, 2020; MADZUNYA *et al.*, 2020; SHIVANANDAPPA; YEROL, 2018; SANKARAN PILLAI *et al.*, 2018; FAANU *et al.*, 2016; AKKAYA *et al.*, 2016; MORENO *et al.*, 2014; KAPDAN *et al.*, 2012; CANBAZOĞLU *et al.*, 2011; KAM; BOZKURT; ILGAR, 2010; DARKO *et al.*, 2010; RAMACHANDRAN, 2008; KAM; BOZKURT, 2007; YARAR; GÜNAYDI; ÇELEBI, 2006; ŽUNIĆ *et al.*, 2006; ÖRGÜN *et al.*, 2005; SUJO *et al.*, 2004; WANG, 2002; BUCHLI; BURKART, 1989) para a contabilização dos resultados radiométricos na forma de cálculos dosimétricos. Este formato permite tanto a comparação dos valores de diferentes tipos de dose com as orientações

fornecidas por órgãos regulatórios internacionais quanto a classificação do risco radiológico local para posterior intervenção mitigatória.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em propriedades particulares localizadas dentro da Área de Proteção Ambiental do Rio Passaúna. Na figura 17 estão dispostos (a) parte do mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná, com a represa principal situada no centro da imagem e (b) a localização das propriedades estudadas (ao redor da represa).

Figura 17 – Região do estudo radiométrico



Fonte: Adaptado de Besser *et al.* (2023); Google Earth® (2024)

Na figura 17a, a região norte da represa, destacada na cor verde, é composta por formação sedimentar, com unidades anfíbolíticas, gnaisses e quartzos, cujas taxas de radioatividade natural são relativamente baixas (embora possa ocorrer o acúmulo de feldspato potássico, o qual é rico em ^{40}K).

Na porção colorida de violeta, que abrange a região sul da represa, a litologia é composta por granitos, gnaisses graníticos e monzogranitos, unidades que acumulam eU e eTh durante sua formação, fato que amplia a necessidade de um levantamento radiológico nesta área habitada.

Devido à legislação vigente para este tipo de zoneamento urbano, existem restrições do uso do solo e da água na região, fato que acarreta na larga utilização de águas de poços para abastecimento local.

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa consistiu em realizar a espectrometria gama e a coleta da água do poço de todas as propriedades analisadas. A partir da determinação dos radionuclídeos superficiais que circundam as habitações, foram estabelecidos pontos para medição da radiação alfa no ar do solo.

Em consonância com os resultados gamaespectrométricos superficiais, foram determinadas as propriedades nas quais seriam instalados os SSNTD.

3.1 Detalhamento da pesquisa de campo

O ponto de partida para o desenvolvimento da pesquisa radiométrica nesta região foi o contato com um morador conhecido. A partir de repetidos encontros com este morador específico, foi estabelecida uma relação de confiança para a investigação da sua propriedade.

Por intermédio da esposa deste indivíduo, foram estabelecidos contatos com diversos habitantes. Alguns moradores optaram por não participar da pesquisa. Outros, nos receberam cordialmente, entretanto, não dispunham de poços de água em suas propriedades, sendo excluídos do levantamento. Uma pequena fração de pessoas aceitou e prosseguiu com o trabalho.

A contrapartida solicitada pelos integrantes do levantamento foi a disponibilização formal dos resultados encontrados. Adicionalmente, foi firmado o acordo de proposição de medidas mitigatórias em casos extremos, os quais eventualmente exigissem intervenção para proteção radiológica.

Todas as propriedades foram escaneadas por espectrometria gama, bem como em todos os poços de abastecimento de água foram coletadas amostras para

avaliação. A aferição do ar do solo seria realizada em todos os pontos cuja taxa de dose absorvida a 1 metro de distância fosse superior à $1 \mu\text{Sv/h}$. A instalação dos detectores de estado sólido nos ambientes internos aconteceria em propriedades cuja varredura gama apresentasse valores acima de $0,4 \mu\text{Sv/h}$ e complementarmente as águas apresentassem atividade alfa global superior a $0,5 \text{ Bq/L}$. Contudo, todo procedimento deveria ser aprovado pelos moradores, fato que por vezes impossibilitou algum passo do levantamento.

3.2 Espectrometria gama de baixa resolução

Os dados gamaespectrométricos foram obtidos com o detector portátil BRD (do inglês: *backpack-based radiation detector*) modelo AT6101C (Atomtex), que possui duas unidades de aquisição de dados: BDKG-11M, unidade referente à detecção de radiação gama; BDKN-05, unidade referente à detecção de nêutrons.

A espectrometria gama é realizada por um cristal cintilador de iodeto de sódio dopado com tálio, de dimensões $63 \times 63 \text{ mm}$, acoplado ao sistema de fotomultiplicação e circuito de discriminação e análise de pulsos (calibração de fábrica – 2018).

Fotografia 1 – Detector portátil BRD



Fonte: Autoria própria (2024)

A fotografia 1 exhibe as unidades de aquisição de dados (a) gama e de (b) nêutrons; (c) o microcontrolador eletrônico; (d) o monitor que controla as medições.

Por meio do método do caminhamento, foram varridas áreas de até centenas de metros quadrados. Vale ressaltar que em todas as propriedades foram feitas exposições prolongadas ao redor dos poços de água com o objetivo de relacionar os elementos detectados pela espectrometria gama com a concentração de radionuclídeos na água.

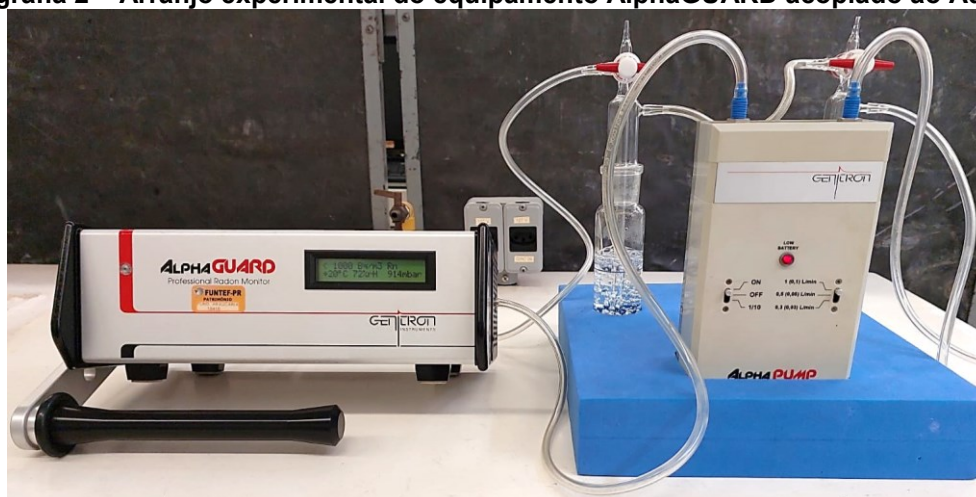
3.3 Medições de atividade alfa

A avaliação da radiação alfa foi realizada em três frentes: na água dos poços, no ar dos solos e no ar interno das residências. As particularidades de cada avaliação estão descritas nas seções posteriores.

3.3.1 Atividade de ^{222}Rn e ^{226}Ra nas águas de poço

As amostras de água coletadas nos poços dos residentes foram avaliadas com o equipamento AlphaGUARD PQ2000 PRO (Saphymo, atual Bertin Technologies) acoplado ao AquaKIT em circuito fechado, como ilustra a fotografia 2. De acordo com o manual do equipamento, a eficiência de detecção está entre 2 e 2M Bq/m³ (0,002 a 2000 Bq/L).

Fotografia 2 – Arranjo experimental do equipamento AlphaGUARD acoplado ao AquaKIT



Fonte: Autoria própria (2024)

Foram realizadas cinco medições de concentração de ^{222}Rn em cada amostra de água, executadas em intervalos de 4 dias entre si, tempo aproximadamente igual ao tempo de meia-vida do elemento. Por fim, foi realizada uma medida adicional 38

dias após a coleta da amostra, com o intuito de medir a concentração de ^{222}Rn em equilíbrio secular com o ^{226}Ra .

Na sequência, foram construídos gráficos de concentração em função do tempo, os quais foram ajustados por meio da equação 19. Nesta equação, foi necessário adicionar uma parcela para contabilizar a quantidade de ^{222}Rn não proveniente do ^{226}Ra dissolvido na água, mas sim originário de outras fontes, como as rochas circundantes.

Com esta correção, a equação 17 torna-se

$$A_{222}(t) = A_{0_{226}}(1 - e^{-\lambda_{222}t}) + A_{0_{222}}(e^{-\lambda_{222}t}) \quad (19)$$

Onde a primeira parcela é relacionada ao ^{222}Rn produto do decaimento do ^{226}Ra dissolvido na água e a segunda parcela é relacionada ao ^{222}Rn produto do decaimento do ^{226}Ra localizado em outro compartimento.

3.3.2 Atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo

Nos solos, a medição alfa foi performada com o mesmo equipamento, porém em circuito aberto e acoplado à sonda capilar, como disposto na figura 11. A fotografia 3 exibe o arranjo *in loco*.

Fotografia 3 – Medida de Rn e Tn no ar do solo *in loco*



Fonte: Autoria própria (2024)

Os pontos de medição foram escolhidos onde a espectrometria gama identificou altas concentrações dos isótopos de Th e Ra.

Inicialmente, foi ligada a bomba de sucção, a qual permaneceu ligada por 10 minutos para que a mistura do ar do solo com o ar da cavidade acontecesse. Em seguida, procedeu-se a medição por mais 10 minutos em regime permanente de fluxo de ar. Após este período, a medição continuou com a bomba desligada.

Os dados obtidos foram dispostos em um gráfico de concentração de Rn em função do tempo. O ajuste desta curva foi realizado por meio da equação 11. Este ajuste atrelado ao procedimento experimental descrito, permite a distinção das atividades de ^{222}Rn e ^{220}Rn .

3.3.3 Atividade de ^{222}Rn indoor

Para o monitoramento dos ambientes internos das residências, foram instalados detectores de estado sólido em todos os cômodos de duas propriedades, nas quais foram encontrados valores maiores de atividade no solo.

A câmara de difusão adotada para o processo de medição foi a proposta por Urban e Piesch (1981), com formato semiesférico de volume sensível igual a $7,1\text{ cm}^3$. Nesta configuração, é possível reduzir a deposição dos elementos filhos do Rn sobre o material radiosensível. Além disso, utilizou-se filtros de fibra de vidro na entrada de ar da câmara para a filtragem de particulados e permeabilidade do Rn.

A montagem das câmaras de difusão com o filtro e o CR-39 está ilustrada na fotografia 4. O filtro protege o detector contra danos e aerossóis. A câmara homogeneiza o processo de detecção.

Fotografia 4 – Câmara de difusão



Fonte: Autoria própria (2024)

Para os cálculos de concentração de Rn no ar, foi utilizada a equação de calibração desenvolvida por Corrêa (2011) em parcerias com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e o *National Institute of Radiological Sciences* (NIRS, 2010).

$$C = (405 \pm 30)d \left[\frac{Bq}{m^3} \right] \quad (20)$$

Onde ' d ' representa o número de traços por hora de exposição em 1 cm² do detector.

As exposições foram realizadas durante o período de aproximadamente 4 meses em ambas as residências.

A revelação dos detectores seguiu o protocolo consolidado por Corrêa (2011), com banho dos detectores em solução de NaOH à 6,25 M, durante 14 horas à 70 °C.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos dados gamaespectrométricos foi realizada a partir do *software* GARM® (do inglês: *Geolocation Application for Radiation Monitoring*), no qual é possível sobrepor os dados coletados de dose absorvida a um metro¹ (DR1) com imagens retiradas do *Google Maps*. Vale ressaltar que tais imagens estão desatualizadas em relação ao ano de 2024 e não é possível identificar a versão do *Google Maps* a qual o GARM acessa. Por meio deste *software*, também foi possível retirar o espectro total coletado durante a medição, exibindo as janelas de energia de identificação de radionuclídeos.

A avaliação dos dados de concentração de Rn nas águas e no ar do solo foi realizada com o *software* DataEXPERT®. O tratamento dos dados e a construção dos gráficos exponenciais foram performados com o *software* OriginLab®.

Optou-se por apresentar os resultados do levantamento radiométrico por propriedade caracterizada. Portanto, cada segmento exibe o mapa com curvas de nível de radiação; o espectro gama total coletado; a curva de ajuste da concentração de Rn na água do poço da respectiva residência; a curva de ajuste da concentração de Rn no ar do solo que circunda a residência (quando avaliado); os dados de concentração de Rn no ar dos ambientes internos (quando avaliado).

4.1 Propriedade 1

A propriedade 1 possui 2 residências, uma do proprietário do local e outra da família do funcionário, popularmente conhecido como 'caseiro'. As duas residências são construídas em alvenaria, uma ao lado da outra. Não desenvolvem atividades de plantio nem pecuária.

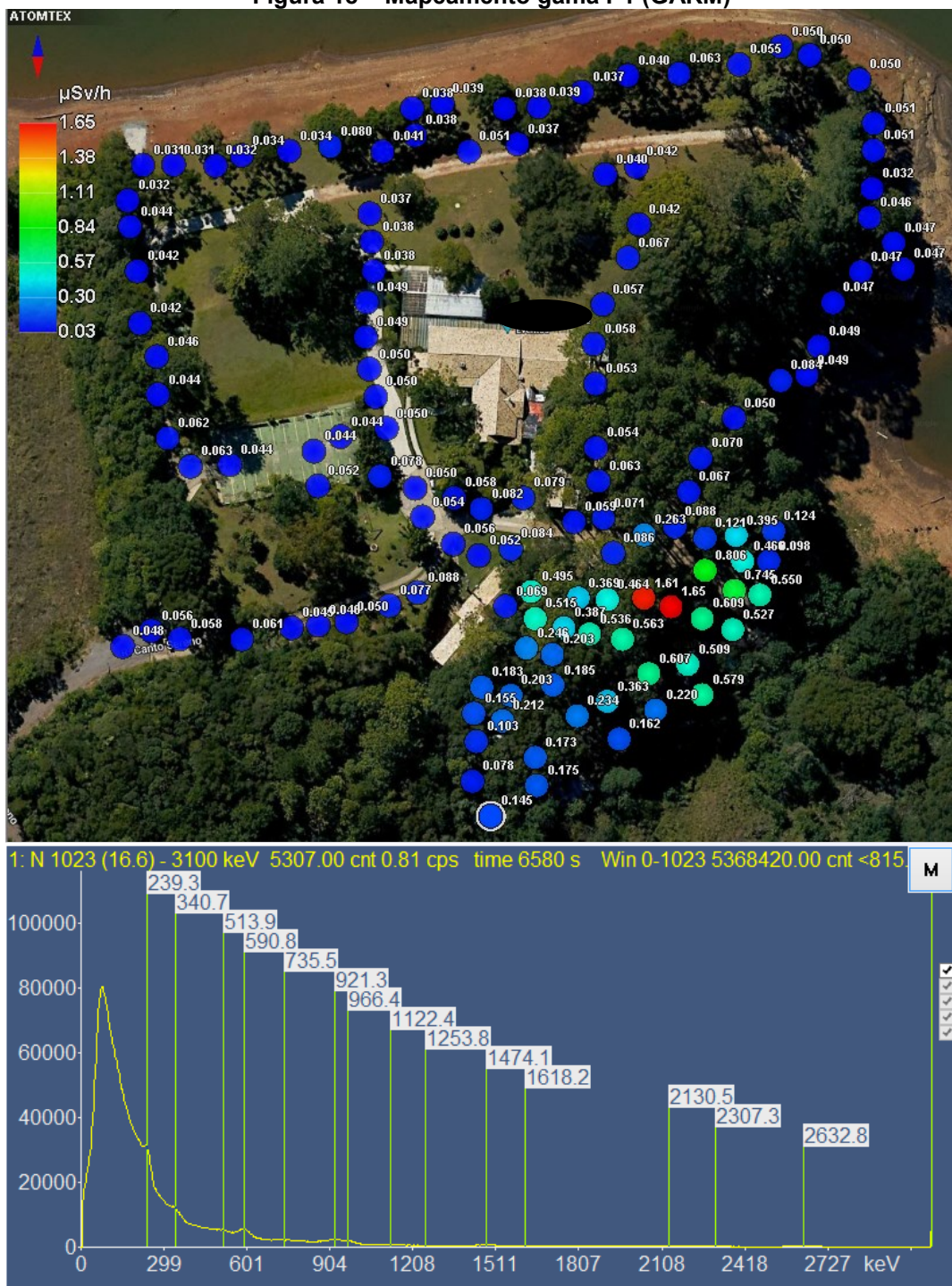
Ambas as residências são abastecidas exclusivamente por 2 poços de água localizados ao redor das construções. A água utilizada passa por um filtro industrial cujo objetivo é a barragem de metais pesados.

Há um anexo amplo e aerado, destinado ao aluguel e realização de festas e cerimônias, também abastecido por estes poços.

¹ A taxa de dose absorvida ao ar livre proveniente de radiação gama natural a 1 metro de distância da superfície (DR1) é uma conversão da atividade específica de um determinado elemento crustal em dose.

A figura 18 exibe os dados georeferenciados da propriedade P1 e o espectro total coletado durante o caminhamento.

Figura 18 – Mapeamento gama P1 (GARM)



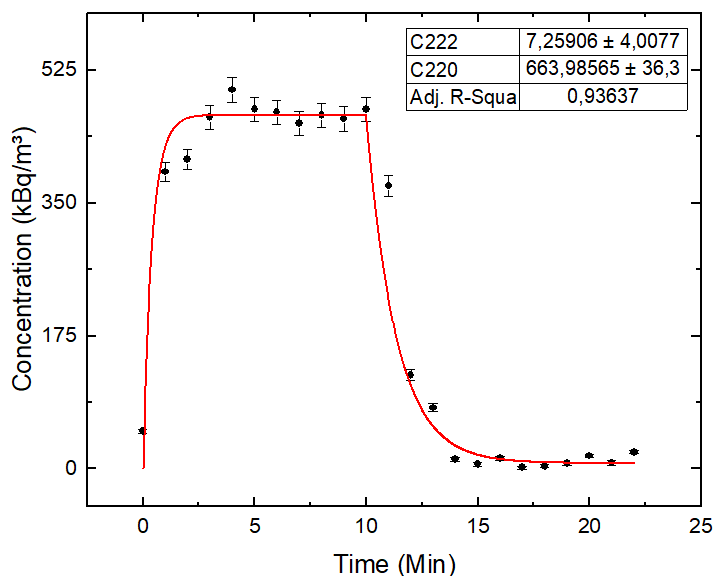
(*) Tarja posicionada para suprimir o nome da propriedade
Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno, foram identificados os isótopos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{228}Th , vide energias disponíveis nas tabelas 1 e 2.

Também é possível observar pontos com DR1 igual a 1,65 $\mu\text{Sv/h}$. Neste ponto específico, foram identificados os nuclídeos ^{232}Th e ^{228}Th .

Posteriormente, foram realizadas medições da atividade alfa no ar do solo nesta região. Os dados coletados estão dispostos no gráfico 1. O ajuste dos pontos foi realizado por meio da equação 11.

Gráfico 1 – Ajuste das concentrações de ^{222}Rn e ^{220}Rn no ar do solo



Fonte: A autoria própria (2024)

Os coeficientes C220 e C222 fornecidos pelo ajuste para as concentrações de ^{220}Rn e ^{222}Rn no ar do solo foram (664 ± 36) kBq/m^3 e (7 ± 4) kBq/m^3 , respectivamente.

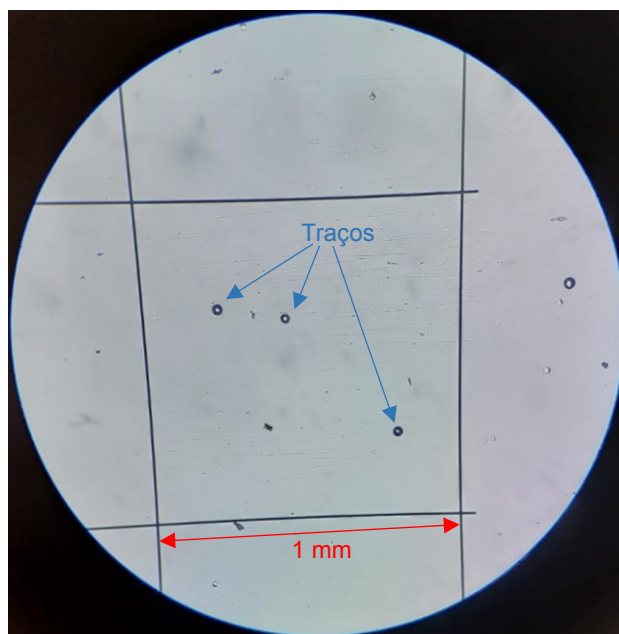
Além dos valores nominais dos coeficientes, é possível observar pela curva a predominância do torônio, uma vez que após o desligamento da bomba no instante de tempo igual a 10 minutos, a concentração total de Rn quase zero.

Embora não existam valores limite e referência para tais concentrações no solo, infere-se como anômala a atividade encontrada para o torônio.

Devido ao fato deste ponto anômalo circundar as casas do proprietário (1B) e do caseiro (1A), foram instalados detectores de estado sólido em todos os cômodos das duas residências, exceto nos banheiros por opção dos moradores. As exposições ocorreram durante aproximadamente 3 meses.

A revelação dos detectores e a contagem dos traços seguiu a metodologia estabelecida nas seções anteriores. Na fotografia 5 estão exibidos os traços referentes ao cômodo 'quarto do filho' da casa Cc.

Fotografia 5 – Traços no CR-39 referentes ao ‘quarto do filho’ (foto do microscópico ótico)



Fonte: Autoria própria (2024)

Por meio da equação 20, foram determinadas as concentrações em cada cômodo para as duas residências. Os resultados encontrados estão dispostos nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Concentração de ^{222}Rn indoor na residência 1A

Cômodo	Concentração (Bq/m^3)	Erro na concentração (Bq/m^3)
Quarto do filho	79	6
Quarto do casal	30	2
Sala/cozinha	48	4

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 5 – Concentração de ^{222}Rn indoor na residência 1B

Cômodo	Concentração (Bq/m^3)	Erro na concentração (Bq/m^3)
Quarto do casal	48	4
Escritório	49	4
Depósito	89	6
Sala/cozinha	62	5

Fonte: Autoria própria (2024)

No tocante às análises da água dos poços da propriedade P1, os dados de concentração em função do tempo obtidos nas medições de Rn com o AlphaGUARD no arranjo da figura 10 estão organizados nas tabelas 6 e 7.

Esta propriedade possui 2 poços de abastecimento de água, classificados como Po1A e Po1B. O tempo igual a zero representa o momento da coleta da amostra de água.

Tabela 6 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po1A

Po1a	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	2	42,1	1,3
Medição 2	96,5	16,52	0,80
Medição 3	218	6,24	0,46
Medição 4	312,5	3,90	0,37
Medição 5	408,5	1,79	0,28
Eq. secular	915	0,11	0,06

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 7 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po1B

Po1b	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	2	3,02	0,32
Medição 2	99	1,48	0,27
Medição 3	170,5	0,81	0,19
Medição 4	270	0,47	0,35
Medição 5	341	0,29	0,27
Eq. secular	958	0,24	0,28

Fonte: Autoria própria (2024)

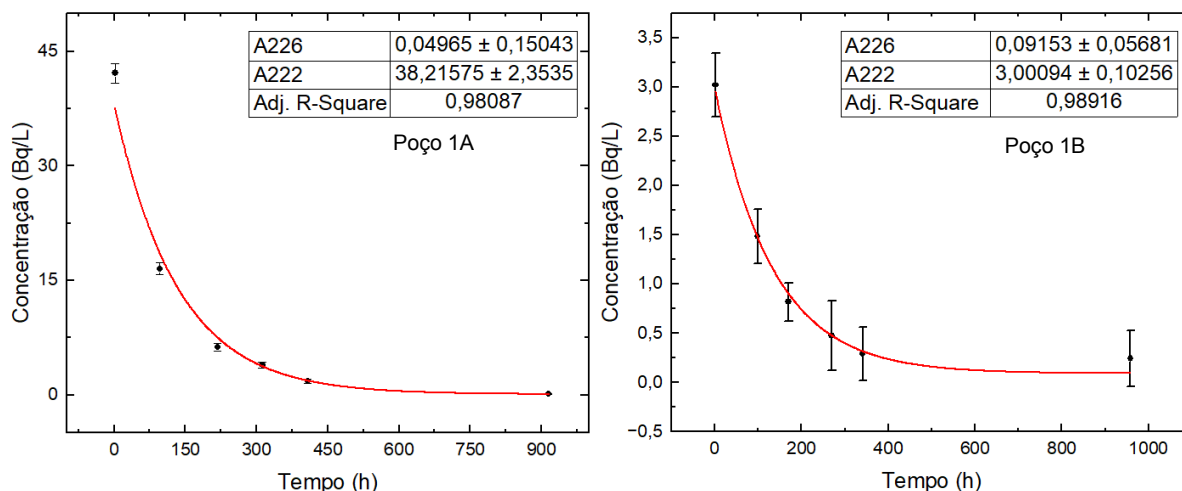
A partir destes dados, foram construídos os gráficos de concentração de Rn em função do tempo para ambos os poços.

A última medida da concentração de Rn nas amostras foi performada durante o equilíbrio secular do ^{222}Rn com o ^{226}Ra . O ajuste dos dados experimentais foi realizado por meio da equação 19, fornecendo os valores da concentração total de ^{222}Rn e ^{226}Ra dissolvidos nas amostras de água dos referidos poços.

Os coeficientes obtidos foram corrigidos pela equação 7 para a obtenção do valor real das concentrações.

Vale ressaltar que não foi objeto de estudo o isótopo ^{220}Rn diluído nas águas, pois com o tempo de meia-vida baixo, este elemento se desintegra por completo em alguns minutos, tempo equiparável ao tempo de deslocamento da água do poço até seu uso.

Gráfico 2 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo nas amostras de água dos poços Po1A e Po1B



Fonte: Autoria própria (2024)

O coeficiente 'A226' do ajuste corresponde ao termo $A_{0_{226}}$ da equação 19 e o coeficiente 'A222' corresponde ao termo $A_{0_{222}}$. Essa nomenclatura é adotada para a análise de todas as amostras de água.

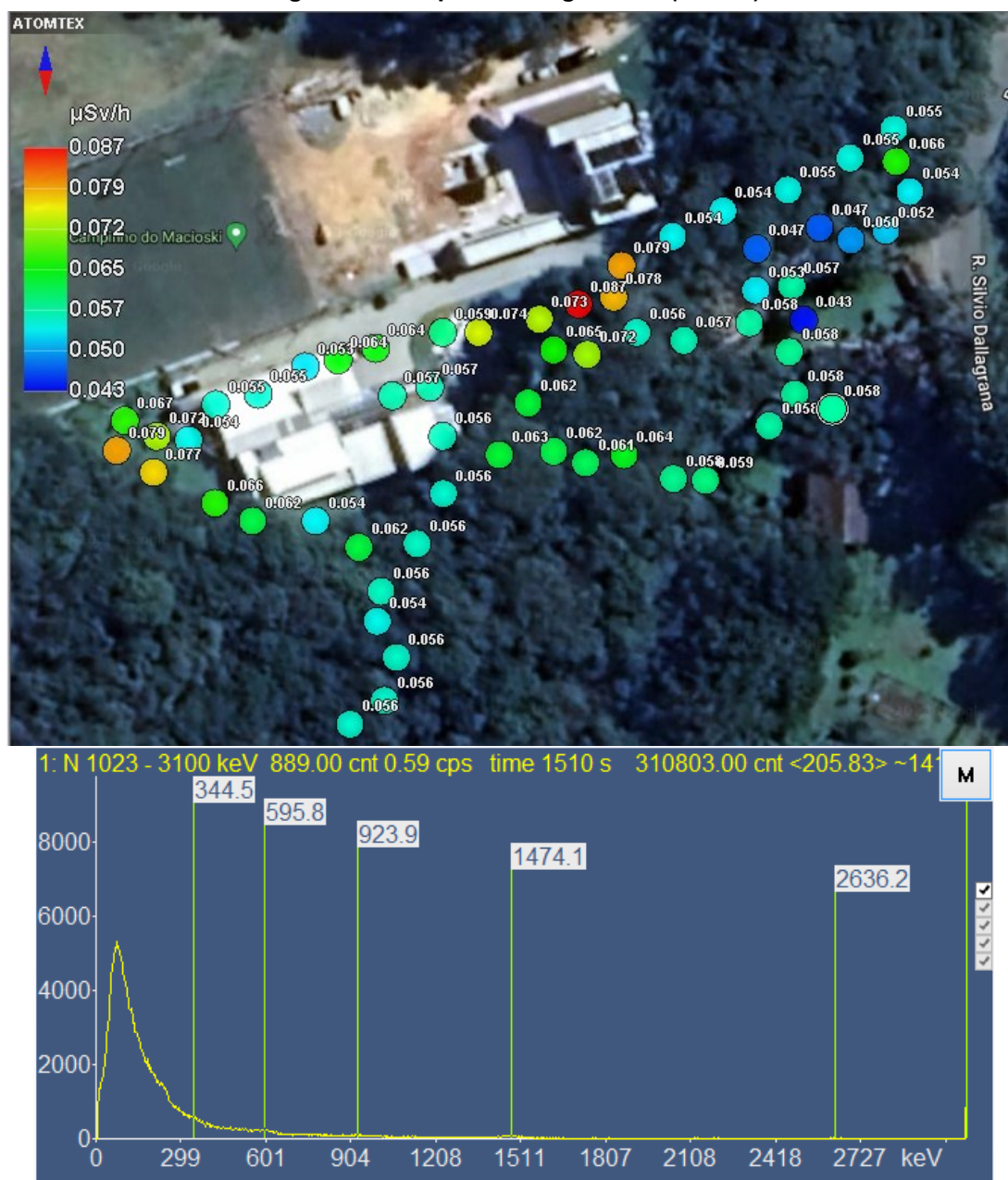
Logo, as atividades de ^{222}Rn e ^{226}Ra encontradas na água do poço Po1A foram $(38,2 \pm 2,4)$ Bq/L e $(0,05 \pm 0,15)$ Bq/L, respectivamente, enquanto no poço Po1B foram $(3,0 \pm 0,1)$ Bq/L e $(0,09 \pm 0,05)$ Bq/L, respectivamente.

Embora ambos estejam localizados na mesma litologia, o poço 1A é aproximadamente 3 vezes mais fundo que o poço 1B, fato que pode explicar a diferença das concentrações.

4.2 Propriedade 2

Na propriedade 2, a residência familiar é composta por dois *containers* empilhados, formando um *duplex*. Um dos *containers* é apoiado diretamente no solo. Existe um anexo em alvenaria relacionado à produção artística (atelier) do casal. Os moradores cultivam pequenos plantios para consumo próprio e são abastecidos tanto por água de poço quanto pela distribuidora estadual.

Figura 19 – Mapeamento gama P2 (GARM)



Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno, foi identificado apenas o isótopo de ^{40}K . No espectro total é possível observar linhas de ^{208}Tl e ^{214}Bi , relacionadas à presença superficial de ^{232}Th e ^{238}U , respectivamente. Porém, o equipamento não caracterizou tais elementos, apresentando apenas o ^{40}K na lista de identificação.

Também foi possível notar na figura 19 que as DR1 nos pontos de medição foram baixas, com valor máximo estipulado em $0,087 \mu\text{Sv/h}$. Por este motivo, não foram instalados detectores de estado sólido no ambiente interno da residência nem foram estipulados pontos de medição alfa do ar do solo.

Os dados de concentração de Rn na água do poço da propriedade 2 foram organizados na tabela 8.

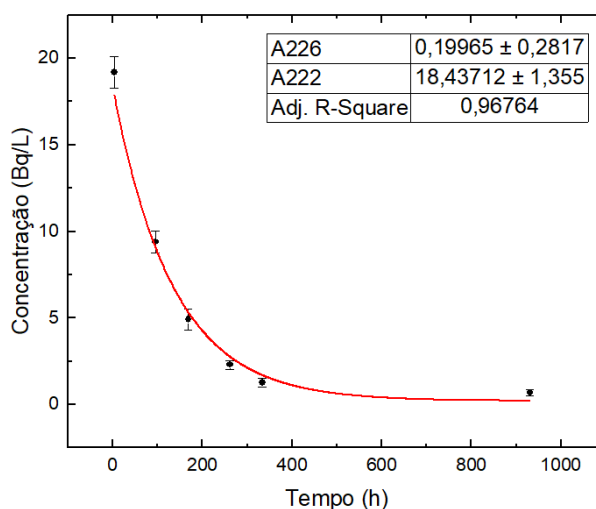
Tabela 8 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po2

Po2	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	4	19,20	0,91
Medição 2	96	9,39	0,63
Medição 3	169	4,90	0,60
Medição 4	261,5	2,30	0,25
Medição 5	334	1,28	0,25
Eq. secular	931	0,68	0,19

Fonte: Autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 3. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 3 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po2



Fonte: Autoria própria (2024)

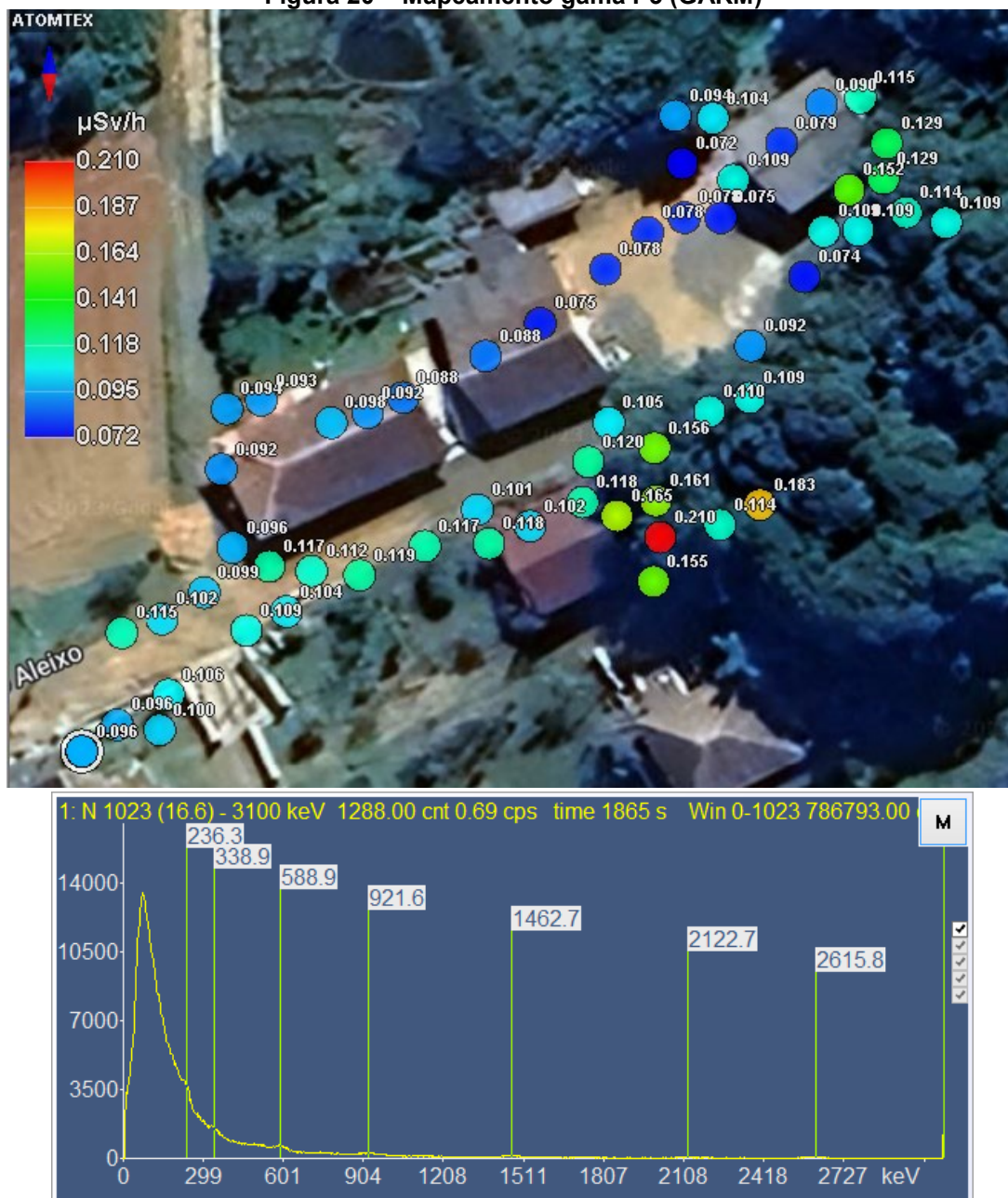
As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 2 foram $(18,4 \pm 1,4)$ Bq/L e $(0,20 \pm 0,28)$ Bq/L, respectivamente.

4.3 Propriedade 3

A propriedade 3 possui uma construção em alvenaria, de convívio familiar, e uma construção em madeira, atualmente utilizada como depósito. Nesta localidade, realiza-se pequena atividade pecuária de suínos. Não foi constatada atividade

agrícola. Todo o abastecimento de água é realizado por um poço localizado nos fundos da propriedade.

Figura 20 – Mapeamento gama P3 (GARM)



Fonte: A autoria própria (2024)

Neste terreno, foram identificados os isótopos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . O ponto de maior DR1 contabilizou $0,210 \mu\text{Sv/h}$, valor abaixo do nível de segurança internacional de $1 \mu\text{Sv/h}$. Portanto, não foram determinados pontos para medição alfa do ar do solo. Pelo mesmo motivo, não foram instalados detectores de estado sólido no interior da residência.

Em relação ao abastecimento de água da propriedade 3, os dados coletados e tratados estão apresentados na tabela 9.

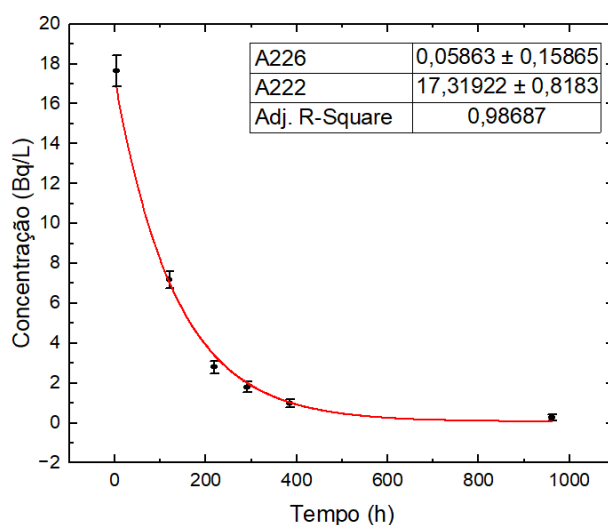
Tabela 9 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po3

Po3	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	4	17,64	0,79
Medição 2	120,5	7,17	0,41
Medição 3	219	2,80	0,31
Medição 4	291,5	1,79	0,26
Medição 5	385	0,98	0,19
Eq. secular	961	0,28	0,16

Fonte: Autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 4. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 4 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po3



Fonte: Autoria própria (2024)

As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 3 foram $(17,32 \pm 0,82)$ Bq/L e $(0,06 \pm 0,16)$ Bq/L, respectivamente.

4.4 Propriedade 4

A propriedade 4 é constituída por 2 construções em alvenaria, uma de posse do proprietário e outra de posse de uma família de funcionários exclusivos, ambas de convívio familiar. É desenvolvida a atividade comercial de cultivo de flores diversas,

com terrenos e estufas espalhados pela propriedade que atendem tal finalidade. O abastecimento de água é integralmente realizado por um poço.

Figura 21 – Mapeamento gama P4 (GARM)



Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno foi identificado apenas o isótopo ^{40}K . De maneira semelhante ao ocorrido na propriedade 2, linhas de ^{208}Tl e ^{214}Bi foram marcadas pelo equipamento, mas sem a identificação precisa de ^{232}Th e ^{238}U .

As DR1 apresentaram valores baixos, com ponto máximo igual a $0,087 \mu\text{Sv/h}$. Em relação ao abastecimento de água da propriedade 4, os dados coletados e tratados estão apresentados na tabela 10.

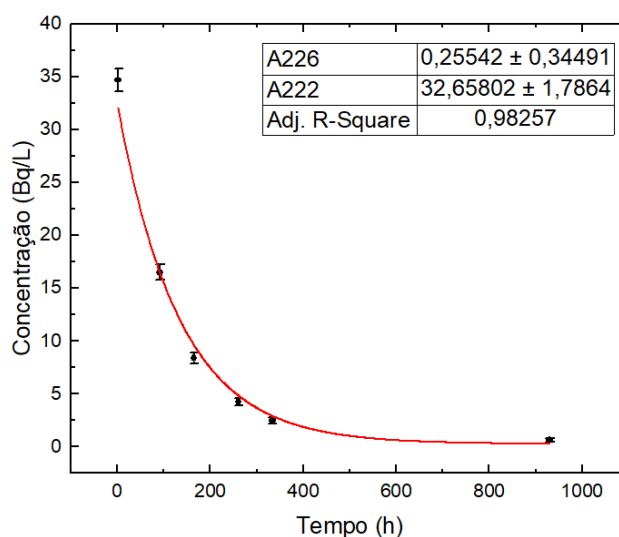
Tabela 10 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po4

Po4	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	2,5	34,7	1,1
Medição 2	92	16,52	0,74
Medição 3	165,5	8,37	0,54
Medição 4	261	4,26	0,35
Medição 5	333,5	2,48	0,28
Eq. secular	930,5	0,67	0,18

Fonte: Autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 5. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 5 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po4



Fonte: Autoria própria (2024)

As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 4 foram $(32,7 \pm 1,8) \text{ Bq/L}$ e $(0,26 \pm 0,35) \text{ Bq/L}$, respectivamente.

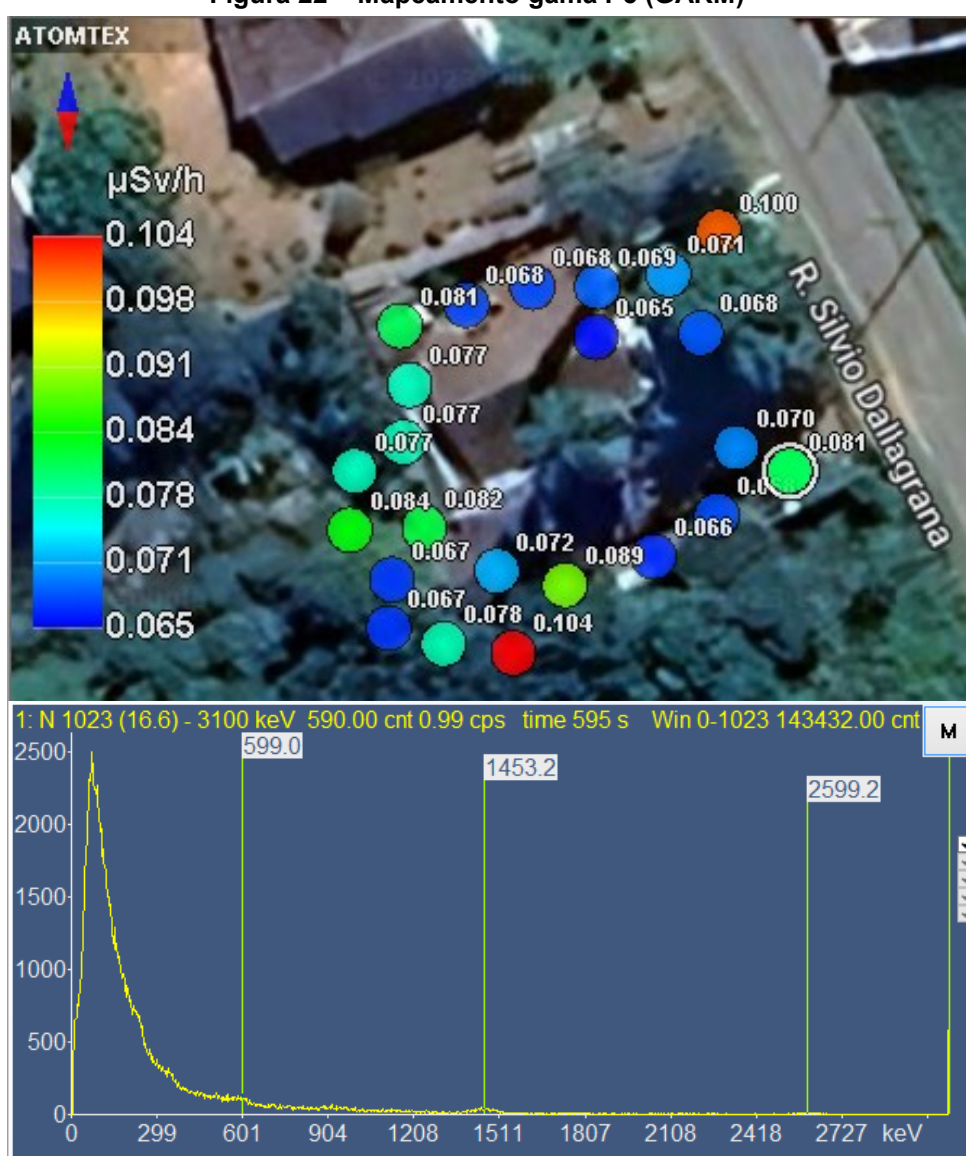
Embora a atividade alfa global nesta água seja relativamente alta, optou-se por não instalar detectores de estado sólido no interior das residências, uma vez que

a espectrometria gama não identificou quantidades significativas dos nuclídeos primordiais.

4.5 Propriedade 5

A propriedade 5 foi o menor terreno analisado, composto por uma residência familiar (em alvenaria) apenas, sem atividades de subsistência ou comercial. O abastecimento de água acontece por um poço, entretanto, os moradores ingerem apenas água mineral adquirida em supermercados.

Figura 22 – Mapeamento gama P5 (GARM)



Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno foi identificado o isótopo de ^{40}K . De maneira semelhante ao ocorrido nas propriedades 2 e 4, linhas de ^{208}Tl e ^{214}Bi foram marcadas pelo equipamento, mas sem a identificação precisa de ^{232}Th e ^{238}U .

As DR1 apresentaram valores baixos, com ponto máximo fixado em 0,104 $\mu\text{Sv/h}$. Não foram instalados detectores de estado sólido nem determinados pontos para medição alfa do ar do solo.

Os dados da análise da água do poço Po5 estão organizados na tabela 11.

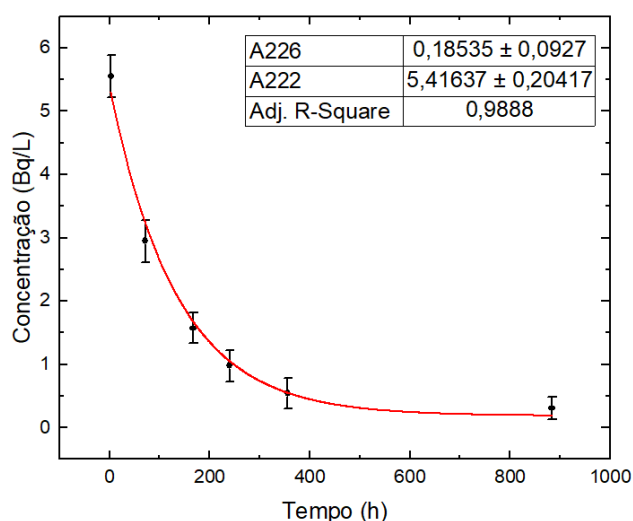
Tabela 11 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po5

Po5	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	3	5,55	0,33
Medição 2	71,5	2,95	0,33
Medição 3	167	1,57	0,24
Medição 4	240	0,98	0,25
Medição 5	356	0,54	0,24
Eq. secular	884	0,31	0,18

Fonte: Autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 6. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 6 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po5



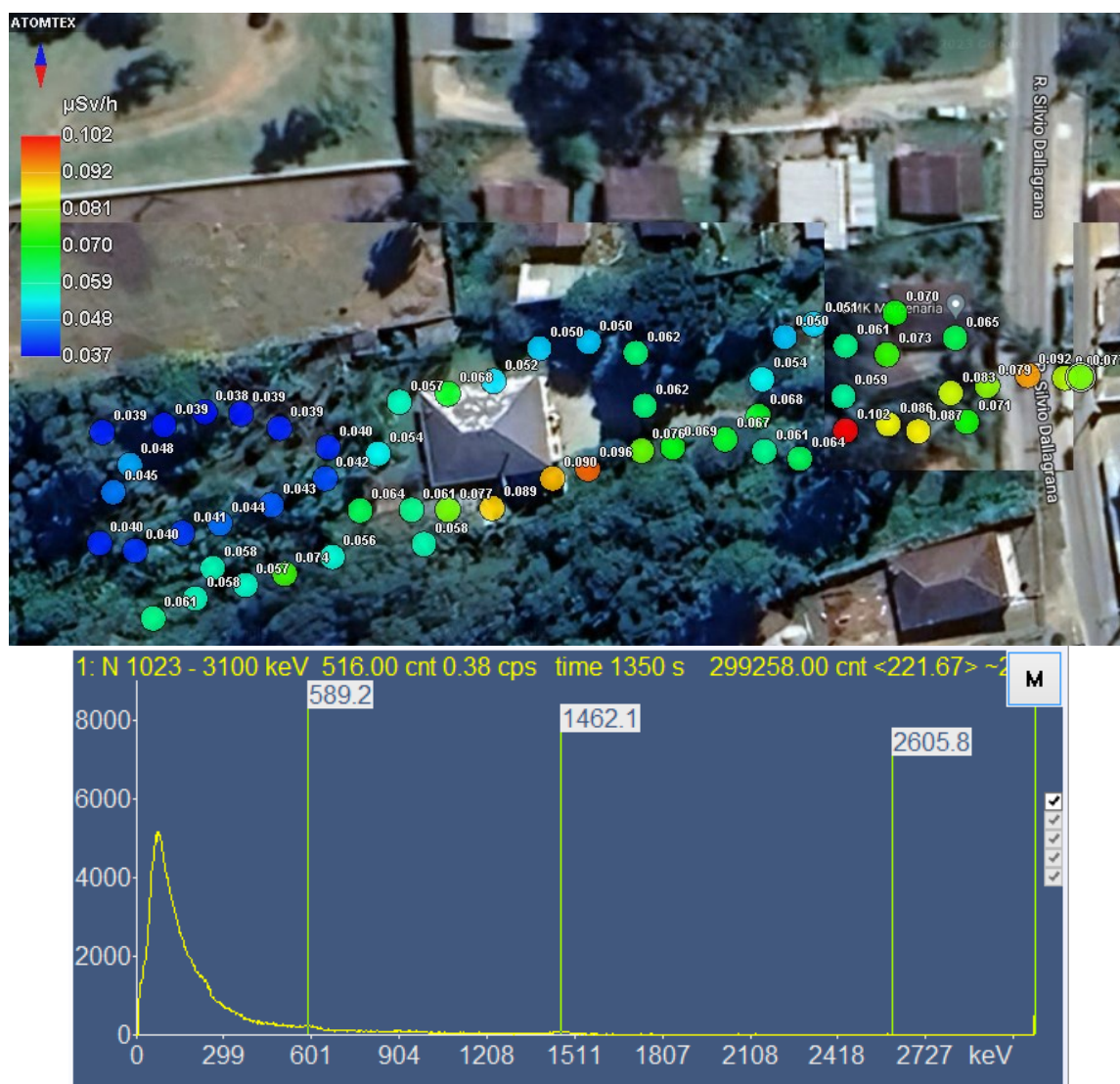
Fonte: Autoria própria (2024)

As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 5 foram $(5,42 \pm 0,20)$ Bq/L e $(0,19 \pm 0,09)$ Bq/L, respectivamente.

4.6 Propriedade 6

A propriedade 6 é composta por 2 residências, uma construída em alvenaria e outra em madeira. Ambas são abastecidas de maneira mista, tanto por um poço próprio, quanto pela concessionária estadual. Possui pequenos plantios orgânicos para consumo imediato. Há uma pequena plantação de cogumelos para comercialização, ainda em início de projeto.

Figura 23 – Mapeamento gama P6 (GARM)



Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno foi identificado o isótopo de ^{40}K . De maneira semelhante ao ocorrido nas propriedades 2, 4 e 5, linhas de ^{208}Tl e ^{214}Bi foram marcadas pelo equipamento, mas sem a identificação certa de ^{232}Th e ^{238}U .

As DR1 apresentaram valores baixos, com ponto máximo fixado em 0,102 $\mu\text{Sv/h}$. Não foram instalados detectores de estado sólido nem determinados pontos para medição alfa do ar do solo.

Os dados da análise da água do poço Po6 estão organizados na tabela 12.

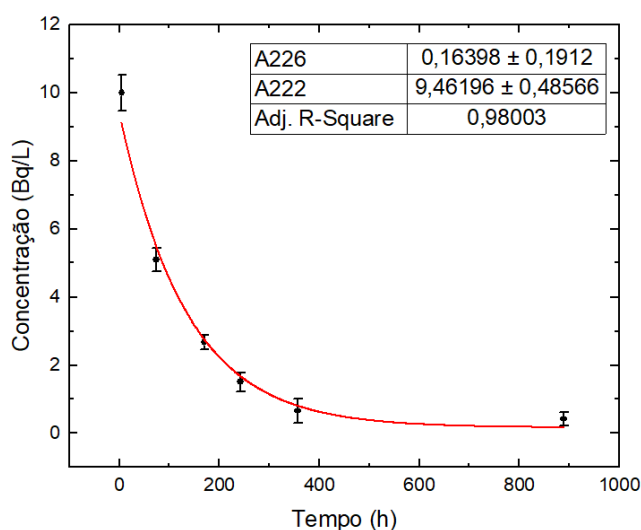
Tabela 12 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po6

Po5	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	5	9,99	0,53
Medição 2	74	5,09	0,34
Medição 3	170	2,67	0,22
Medição 4	242	1,51	0,27
Medição 5	357,5	0,65	0,36
Eq. secular	889,5	0,42	0,21

Fonte: Autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 7. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 7 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po6



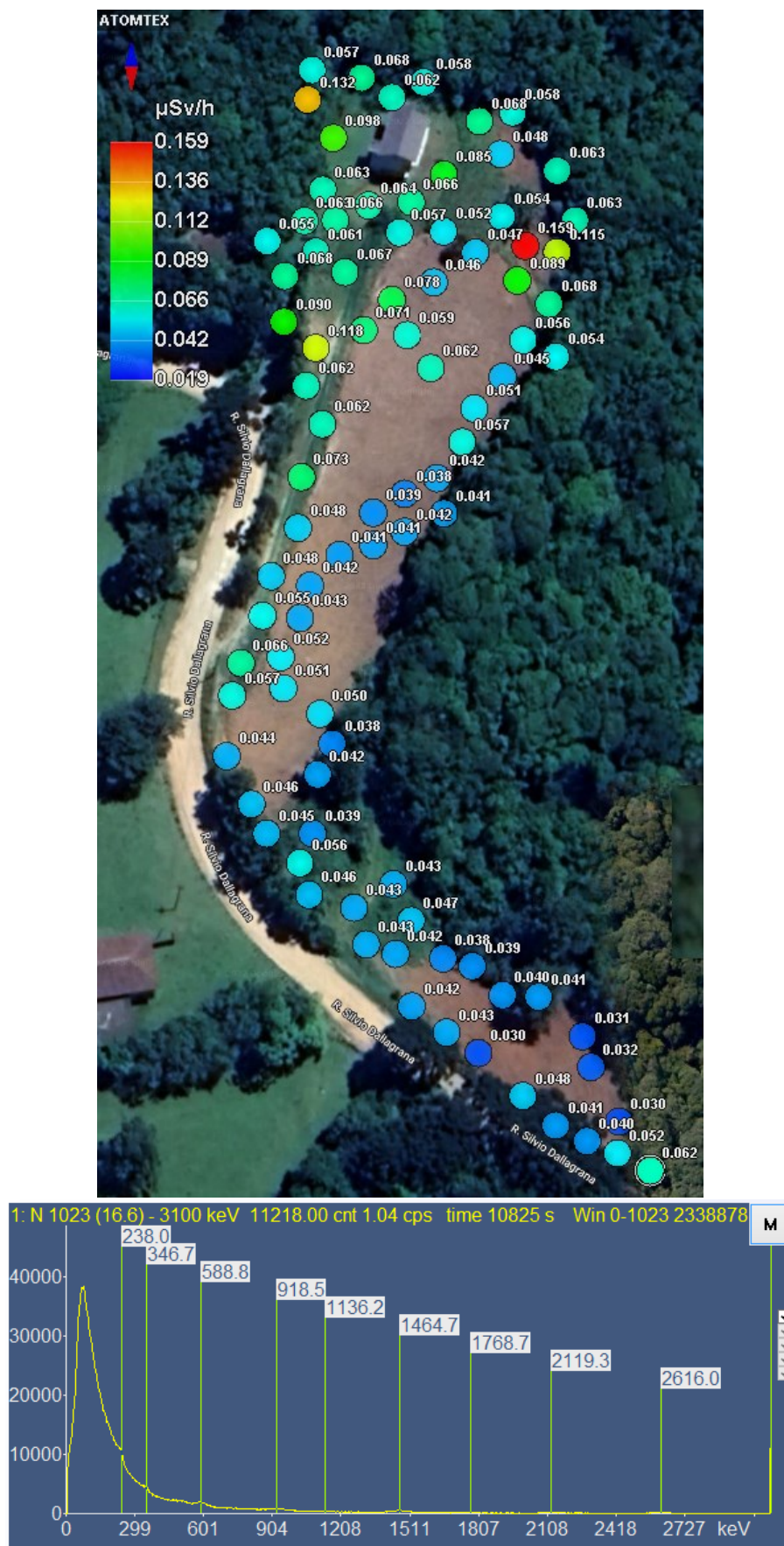
Fonte: Autoria própria (2024)

As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 6 foram $(9,46 \pm 0,49)$ Bq/L e $(0,16 \pm 0,19)$ Bq/L, respectivamente.

4.7 Propriedade 7

A propriedade 7 é composta por duas residências familiares em alvenaria. O abastecimento de água é completamente realizado por um poço, embora seja relatada a presença de 2 poços no local. Os moradores não praticam atividades agropecuárias. O terreno é extenso, sendo possível o mapeamento por caminhar apenas em uma parte da propriedade, onde a vegetação é rasteira e aberta.

Figura 24 – Mapeamento gama P7 (GARM)



Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno foram identificados os isótopos de ^{40}K e ^{232}Th . O ponto de maior DR1 contabilizou 0,159 $\mu\text{Sv/h}$. Apesar do baixo valor, os proprietários solicitaram a instalação de detectores de estado sólido nas residências, para garantir a segurança dos familiares. Em comum acordo, foi decidido atender à solicitação.

Os resultados de concentração de Rn no ar interno das residências foram organizados nas tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Concentração de ^{222}Rn indoor na residência 7A

Cômodo	Concentração (Bq/m³)	Erro na concentração (Bq/m³)
Suíte	270	20
Banheiro suíte	155	11
Quarto 'filhos'	51	4
Cozinha	64	5
Sala	152	11
Banheiro social	67	5
Garagem	67	5

Fonte: A autoria própria (2023)

Tabela 14 – Concentração de ^{222}Rn indoor na residência 7B

Cômodo	Concentração (Bq/m³)	Erro na concentração (Bq/m³)
Cozinha	66	5
Quarto	80	6
Banheiro	34	2

Fonte: A autoria própria (2024)

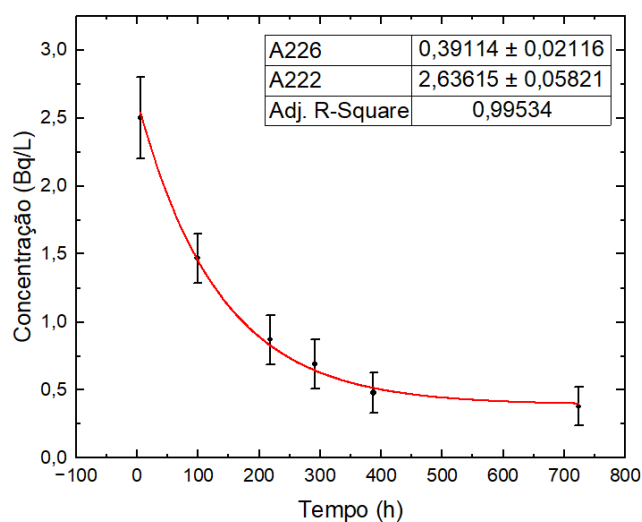
Adicionalmente, foi realizada a coleta da água do poço que abastece a propriedade. Os dados da análise da água do poço Po7 estão organizados na tabela 15.

Tabela 15 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po7

Po7	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	5,5	2,5	0,3
Medição 2	99	1,47	0,18
Medição 3	218,5	0,87	0,18
Medição 4	291,5	0,69	0,18
Medição 5	387,5	0,48	0,15
Eq. secular	723,5	0,38	0,14

Fonte: A autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 8. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 8 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po7

Fonte: Autoria própria (2024)

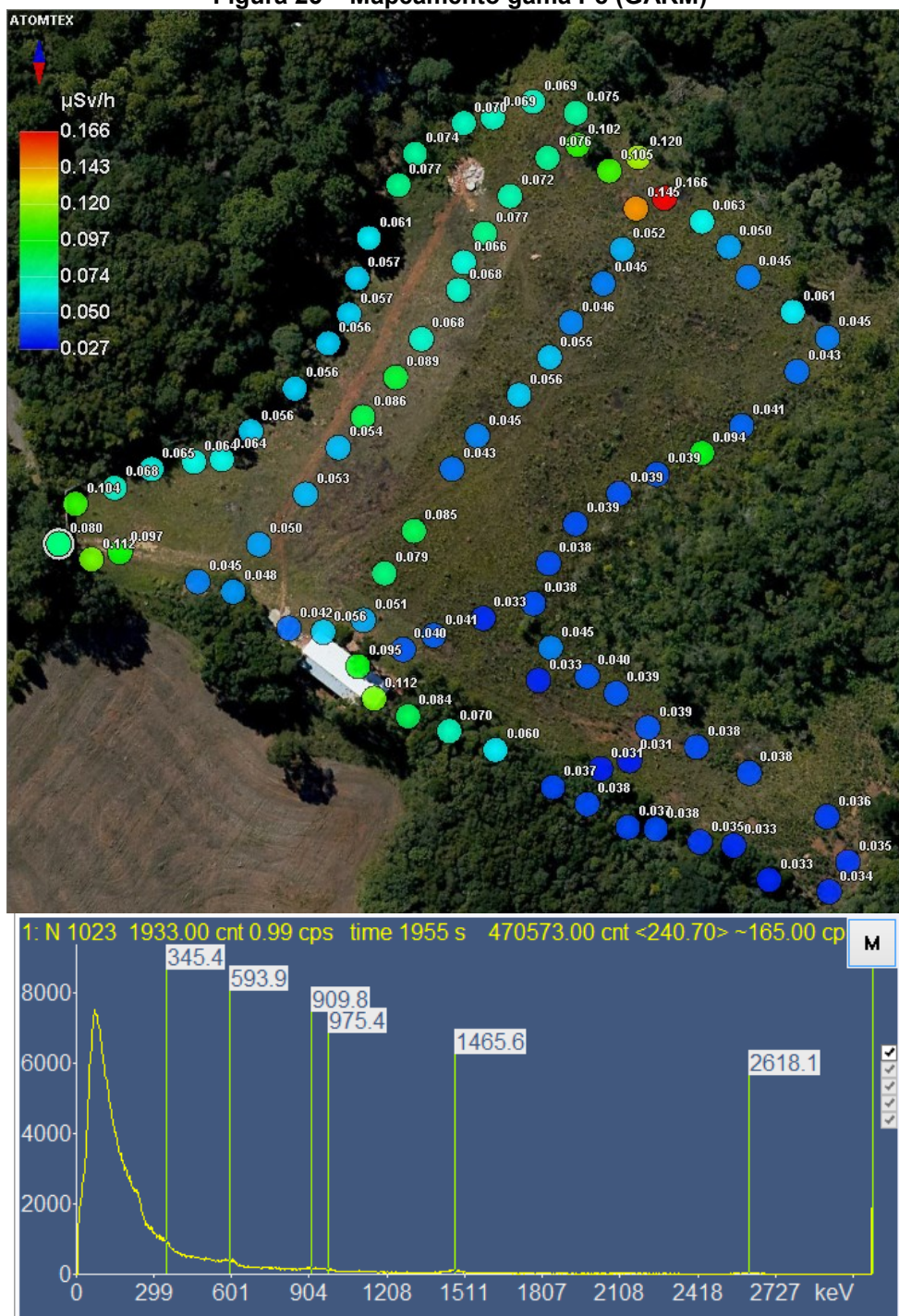
As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 7 foram $(2,640 \pm 0,058)$ Bq/L e $(0,391 \pm 0,021)$ Bq/L, respectivamente.

Embora as concentrações de ^{222}Rn nos cômodos 'suíte' e 'banheiro suíte' estejam relativamente elevadas, não foi constatada atividade significativa no abastecimento de água (fato que poderia enriquecer o ar interno desses cômodos). As concentrações altas nos cômodos citados e no ambiente 'sala' podem ser explicadas pela ausência de ventilação, uma vez que os proprietários não ocuparam a casa com frequência nos meses de monitoramento.

4.8 Propriedade 8

A propriedade 8 é uma residência familiar de veraneio. Possui terreno amplo, com uma pequena construção em alvenaria. São desenvolvidos plantios para consumo próprio de árvores frutíferas. O abastecimento de água é realizado por um poço e, nos períodos de seca, por uma mina localizada na propriedade vizinha.

Figura 25 – Mapeamento gama P8 (GARM)



Fonte: Autoria própria (2024)

Neste terreno, foram identificados os isótopos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . O ponto de maior DR1 contabilizou $0,166 \mu\text{Sv/h}$, valor abaixo do nível de segurança internacional de $1 \mu\text{Sv/h}$. Portanto, não foram determinados pontos para medição alfa do ar do solo. Pelo mesmo motivo, não foram instalados detectores de estado sólido no interior da residência.

Em relação ao abastecimento de água da propriedade 8, os dados coletados e tratados estão apresentados na tabela 16.

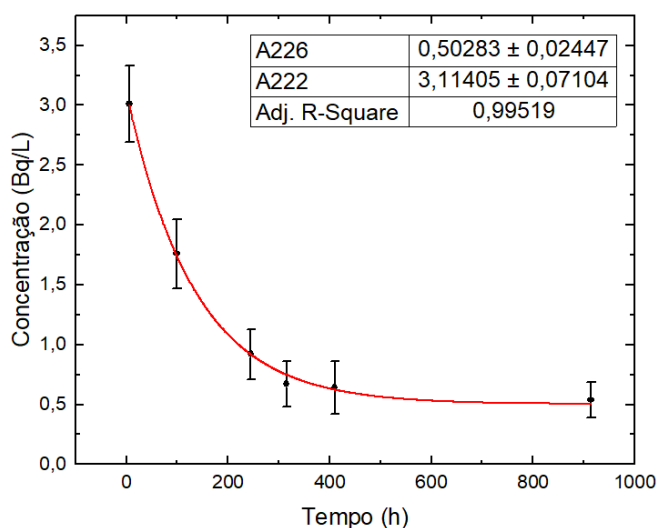
Tabela 16 – Dados de concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po8

Po8	Tempo (h)	Concentração (Bq/L)	Erro na concentração (Bq/L)
Medição 1	6	3,01	0,32
Medição 2	99	1,76	0,29
Medição 3	245	0,92	0,21
Medição 4	315	0,67	0,19
Medição 5	410	0,64	0,22
Eq. secular	914	0,54	0,15

Fonte: Autoria própria (2024)

O ajuste dos pontos experimentais está exibido no gráfico 9. O tratamento dos dados seguiu o padrão descrito anteriormente.

Gráfico 9 – Concentração de ^{222}Rn em função do tempo na amostra de água do poço Po8



Fonte: Autoria própria (2024)

As atividades encontradas para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra dissolvidos na água do poço 8 foram $(3,114 \pm 0,071) \text{ Bq/L}$ e $(0,503 \pm 0,024) \text{ Bq/L}$, respectivamente.

4.9 Código Python para leitura dos arquivos .txt gerados pela espectrometria gama

As camadas de imagens do Google geradas dentro do software GARM® são antigas e podem não representar com fidelidade os terrenos estudados. Além disso, a aquisição de espectros por parte do detector acontece a cada 5 segundos (na configuração padrão), gerando dados georeferenciados diversos que são armazenados em formato .txt.

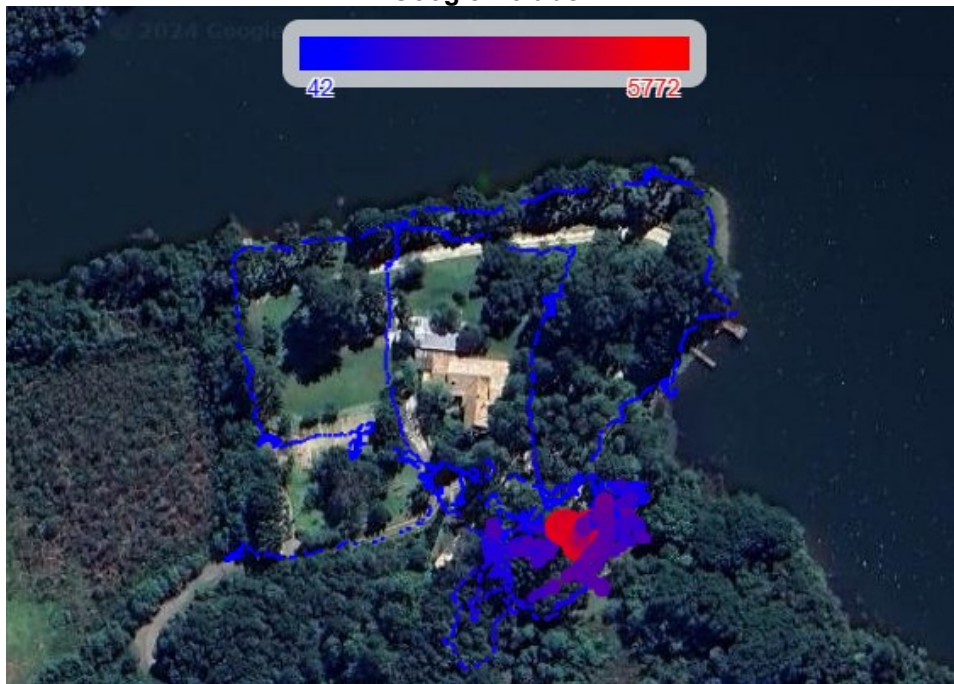
O software compila estes dados para gerar marcadores nos mapas que aglutinam uma certa quantidade de dados, como exibido nas figuras 18 a 25. Esta ação suprime dados adquiridos pelo detector.

Por este motivo, foi desenvolvido um código programado em linguagem python para gerar mapas mais fidedignos, que contemplem todos os dados adquiridos (Anexo A). Este código é capaz de ler os arquivos .txt gerados pela espectrometria, selecionar as colunas de interesse e sobrepor os dados gamaespectrométricos à camada de imagem mais recente do Google Earth®.

Na figura 26 está expressa a imagem gerada pelo código para o mapeamento da propriedade 1. Foram selecionadas as colunas de 'contagem', 'latitude' e 'longitude' no arquivo de texto, as quais formaram ternos ordenados que representam cada ponto de aquisição de dados.

Enquanto na figura 18 existem um pouco mais de uma centena de marcadores, na figura 26 existem mais de 25.000, fato que confere maior confiança e fidelidade aos dados coletados. A quantidade de dados varia de acordo com o tempo de caminharmento e o tempo de espaçamento configurado para a aquisição de dados pelo detector.

Figura 26 – Mapa gerado pelo código python (propriedade 1) executado no ambiente virtual do Google Colab®



Fonte: Autoria própria (2024)

Os dados de latitude e longitude retirados do arquivo de texto são utilizados pelo código para buscar a localização exata de cada ponto mapeado. O tratamento dos dados consiste em excluir as colunas com dados irrelevantes e excluir as linhas em que a latitude, longitude ou a contagem seja 0. Em seguida, uma função é chamada para a leitura dos dados tratados (MCKINNEY, 2018).

Neste código, foi realizada uma normalização dos valores de contagem e definida uma função para calcular a cor dos marcadores de acordo com a contagem em uma escala de cores, ambas ações opcionais. A legenda pode ser personalizada de acordo com as preferências do autor.

4.10 Compilação dos resultados

Os resultados foram compilados nesta seção para facilitar a visualização e favorecer a comparação entre os valores obtidos.

4.10.1 Potabilidade radiológica das águas

Na tabela 17, estão dispostos os valores obtidos de concentração de ^{222}Rn e ^{226}Ra dissolvidos nas águas dos poços estudados em cada propriedade.

Tabela 17 – Resultado compilado das análises das águas

Poço	Concentração de ^{222}Rn (Bq/L)	Concentração de ^{226}Ra (Bq/L)
Po1A	38,2 ± 2,4	0,05 ± 0,15
Po1B	3,0 ± 0,1	0,09 ± 0,05
Po2	18,4 ± 1,4	0,20 ± 0,28
Po3	17,32 ± 0,82	0,06 ± 0,16
Po4	32,7 ± 1,8	0,26 ± 0,35
Po5	5,4 ± 0,2	0,19 ± 0,09
Po6	9,46 ± 0,49	0,16 ± 0,19
Po7	2,640 ± 0,058	0,391 ± 0,021
Po8	3,114 ± 0,071	0,503 ± 0,024

Fonte: Autoria própria (2024)

É possível observar que em todas as propriedades os valores somados das atividades de ^{222}Rn e ^{226}Ra estão abaixo do valor limite de consenso internacional equivalente a 100 Bq/L para intervenção mitigatória.

Seguindo a posição regulatória 3.01/012 da CNEN, foram contabilizadas as atividades específicas de dois radionuclídeos (^{222}Rn e ^{226}Ra) separadamente.

A dose efetiva comprometida para um ano (CED) foi calculada para cada amostra de água por meio da equação 21.

$$D_{ing} = \sum_j TI_{\text{água}} * C_{\text{água}}^j * FCD_{ing}^j \quad (21)$$

O parâmetro D_{ing} representa a dose efetiva comprometida devido à ingestão de água contaminada, expressa em Sv/ano; o parâmetro $TI_{\text{água}}$ contabiliza a quantidade de água ingerida por um indivíduo ao longo do ano, definida pela OMS em 730 litros/ano para adultos, quantidade equivalente ao consumo diário de 2 litros; $C_{\text{água}}^j$

é a concentração do radionuclídeo j dissolvido na amostra de água, em Bq/L; FCD_{ing}^j é o fator de conversão de dose para a ingestão do radionuclídeo j , em Sv/Bq.

Os resultados encontrados para a dose gerada pela ingestão dos isótopos de ^{222}Rn e ^{226}Ra estão organizados na tabela 18.

Tabela 18 – Dose comprometida efetiva (CED) para ingestão de ^{222}Rn e ^{226}Ra

Poço	CED ing ^{222}Rn (mSv/ano)	CED ing ^{226}Ra (mSv/ano)	CED ing total (mSv/ano)
Po1A	0,278860	0,010220	0,289080
Po1B	0,021900	0,018396	0,040296
Po2	0,134612	0,040880	0,175492
Po3	0,126436	0,012264	0,138700
Po4	0,238418	0,053144	0,291562
Po5	0,039566	0,038836	0,078402
Po6	0,069058	0,032704	0,101762
Po7	0,019272	0,079920	0,099192
Po8	0,022732	0,102813	0,125545

Fonte: Autoria própria (2024)

Todos os poços apresentaram valores de CED para ingestão de ^{222}Rn e ^{226}Ra somados que ultrapassam o nível de orientação proposto pela WHO (2011) de 0,02 mSv/ano para um adulto do público comum.

Entretanto, cerca de 90% da dose efetiva atribuível ao Rn presente na água potável é proveniente da inalação deste gás, o qual é liberado durante agitação ou aquecimento da água contaminada durante atividades domésticas corriqueiras. Portanto, foi calculada a CED anual para inalação do ^{222}Rn dissolvido nas águas dos poços seguindo a metodologia descrita na publicação da UNSCEAR (2000) por meio da equação 22.

$$D_{inal} = C_{Rn\grave{a}gua} * R * F_{eq} * I * FCD_{inal}^{Rn} \quad (22)$$

Onde o parâmetro D_{inal} representa a dose efetiva comprometida devido à inalação de água contaminada com ^{222}Rn , expressa em $\mu\text{Sv/ano}$; o parâmetro $C_{Rn\grave{a}gua}$ contabiliza a concentração do isótopo de ^{222}Rn dissolvido na amostra de água [kBq/m^3]; R representa o coeficiente de incremento de ^{222}Rn no ar *indoor* a partir da concentração de ^{222}Rn dissolvido na água (10^{-4}); F_{eq} é o fator de equilíbrio entre o ^{222}Rn e seus progênies (0,4); I contabiliza o tempo médio de ocupação interna por um

indivíduo comum (7000 horas/ano); FCD_{inal}^{Rn} é o fator de conversão de dose para a inalação de ^{222}Rn [(9 nSv (Bq hm⁻³)⁻¹)].

Os resultados dos cálculos dosimétricos estão expressos na tabela 19.

Tabela 19 – Dose comprometida efetiva (CED) para inalação de ^{222}Rn

Poço	CED inal ^{222}Rn (mSv/ano)
Po1A	0,096264
Po1B	0,007560
Po2	0,046469
Po3	0,043646
Po4	0,082303
Po5	0,013658
Po6	0,023839
Po7	0,006653
Po8	0,007847

Fonte: Autoria própria (2024)

Ao realizar a adição das CED de ingestão e inalação para o ^{222}Rn e o ^{226}Ra , obtém-se quantidades acima da referência estabelecida pela WHO (2011) de 0,1 mSv/ano para os poços Po1A, Po2, Po3, Po4, Po6, Po7, Po8² como exibido na tabela 20.

Tabela 20 – Resultado final da análise das águas

Poço	Concentração de ^{222}Rn (Bq/L)	Concentração de ^{226}Ra (Bq/L)	CED ing ^{222}Rn (mSv/ano)	CED ing ^{226}Ra (mSv/ano)	CED inal ^{222}Rn (mSv/ano)	CED Total (mSv/ano)
Po1A	38,2 ± 2,4	0,05 ± 0,15	0,27886	0,010220	0,096264	0,385344
Po1B	3,0 ± 0,1	0,09 ± 0,05	0,02190	0,018396	0,007560	0,047856
Po2	18,4 ± 1,4	0,20 ± 0,28	0,13461	0,040880	0,046469	0,221959
Po3	17,32 ± 0,82	0,06 ± 0,16	0,12643	0,012264	0,043646	0,182340
Po4	32,7 ± 1,8	0,26 ± 0,35	0,23841	0,053144	0,082303	0,373857
Po5	5,42 ± 0,20	0,19 ± 0,09	0,03956	0,038836	0,013658	0,092054
Po6	9,46 ± 0,49	0,16 ± 0,19	0,06905	0,032704	0,023839	0,125593
Po7	2,640 ± 0,058	0,391 ± 0,021	0,019272	0,079920	0,006653	0,105845
Po8	3,114 ± 0,071	0,503 ± 0,024	0,02273	0,102813	0,007847	0,133392

Fonte: Autoria própria (2024)

² As doses efetivas para cada órgão, como estômago e pulmão (os quais são tipicamente afetados pela radiação alfa do ^{222}Rn e ^{226}Ra), podem ser estimadas multiplicando os valores de CED pelos fatores de ponderação dos respectivos órgãos.

Nas publicações desta década listadas no quadro 4 da seção 2.2, com escopo semelhante ao proposto neste trabalho, é possível encontrar dados de atividade alfa em água potável em diversas regiões do globo.

De acordo com Bonotto e Lunardi (2023), medidas da atividade de ^{222}Rn dissolvido em águas subterrâneas para consumo, na região de Caldas Novas, registraram valores de 510 a 11900 mBq/L, enquanto a atividade de ^{226}Ra variou de 0,11 a 0,50 mBq/L.

Na Grécia, mais especificamente na aldeia de Arnea, as aferições realizadas por Omirou *et al.* (2023) acerca da concentração de ^{222}Rn dissolvido em amostras de água de poços de abastecimento local flutuaram entre 54,5 e 838,5 Bq/L.

Na província turca de Gumushane, segundo Kaya *et al.* (2020), o valor da atividade alfa global em águas subterrâneas de consumo variou de 3 a 110 mBq/L.

Já em Taiwan, a pesquisa publicada por CHAO *et al.* (2020) relatou valores de atividade alfa global ligeiramente superiores a 0,55 Bq/L.

No continente africano, dados publicados por Madzunya *et al.* (2020) concernentes à atividade alfa global de águas potáveis não subterrâneas revelaram valores entre 4,1 e 5,3 mBq/L.

É consenso científico que a geologia local tem grande influência na concentração de Rn nos compartimentos do ecossistema. Entretanto, os valores de atividade de ^{222}Rn e o ^{226}Ra nas águas subterrâneas obtidos nesta pesquisa são significativos em comparação com os trabalhos de Bonotto e Lunardi (2023), Kaya *et al.* (2020), CHAO *et al.* (2020) e Madzunya *et al.* (2020). A região de pesquisa de Omirou *et al.* (2023) é notadamente anômala, com concentrações aumentadas de Rn provenientes da formação granítica local, justificando os altos valores encontrados. Ainda assim, as menores concentrações relatadas na referida região são comparáveis às concentrações nos poços avaliados neste trabalho.

4.10.2 Mapeamento superficial de radionuclídeos

Os valores de DR1 mínimas e máximas encontrados em cada propriedade estão dispostos na tabela 19. Também foram compilados os isótopos detectados superficialmente.

Tabela 21 – Valores coletados de espectrometria gama superficial

Propriedade	Nuclídeos identificados	DR1 mínima ($\mu\text{Sv/h}$)	DR1 máxima ($\mu\text{Sv/h}$)
P1	^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{228}Th	0,030	1,650
P2	^{40}K	0,043	0,087
P3	^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th	0,072	0,210
P4	^{40}K	0,041	0,087
P5	^{40}K	0,065	0,104
P6	^{40}K	0,037	0,102
P7	^{40}K , ^{232}Th	0,019	0,159
P8	^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th	0,027	0,166

Fonte: Autoria própria (2024)

Os dados gamaespectrométricos apontaram valores relativamente baixos. A exceção foi um ponto com DR1 equivalente a 1,65 $\mu\text{Sv/h}$ localizado na propriedade 1. Medidas de atividade alfa do ar do solo apontaram a predominância do isótopo de ^{220}Rn , fato que corrobora com a espectrometria gama superficial que indicou a presença de ^{232}Th e ^{228}Th neste local. A aferição do ar das residências circundantes a este ponto anômalo não apresentou enriquecimento significativo de Rn *indoor* (vide tabelas 4 e 5).

A detecção expressiva de ^{40}K em todos os terrenos está de acordo com o mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná, compilado por Besser *et al.* (2021), onde é possível situar a APA do Passaúna sobre a formação rochosa de granito/gnaiss. Tal estrutura pode conter feldspato potássico, tipicamente rico em ^{40}K . Os pontos de cobertura sedimentar com presença de arcósios também podem acumular ^{40}K em determinadas regiões.

Além disso, a origem ígnea do granito/gnaiss pode acarretar na presença de urânio e descendentes, justificando a identificação de ^{226}Ra e ^{214}Bi .

Vale ressaltar que a exposição à radiação proveniente das rochas é baixa, uma vez que o sistema é fechado. Entretanto, as alterações nestas rochas causadas por intemperismo podem aumentar a exposição significativamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento radiométrico realizado nesta pesquisa abarcou a espectrometria gama superficial externa, a quantificação das atividades específicas de ^{222}Rn e ^{226}Ra dissolvidos em amostras de água potável e o monitoramento do ^{222}Rn *indoor* em propriedades particulares situadas na APA do Passaúna.

Os valores encontrados para a taxa de dose absorvida ao ar livre proveniente de radiação gama natural a 1 metro de distância da superfície foram relativamente baixos, variando de 0,019 a 0,210 $\mu\text{Sv/h}$. A exceção foi um ponto anômalo localizado na propriedade 1 com DR1 equivalente à 1,65 $\mu\text{Sv/h}$. O tratamento específico realizado neste ponto consistiu em avaliar a atividade alfa do ar do solo e a instalação de detectores de estado sólido nas residências circundantes. A espectrometria alfa apontou a predominância do isótopo ^{220}Rn , com concentração igual a (664 ± 36) kBq/m^3 . Não foram observados incrementos de Rn *indoor* nas respectivas residências, uma vez que o ponto anômalo não está localizado logo abaixo das construções, além do tempo de meia-vida do isótopo preponderante ser curto.

A detecção expressiva de ^{40}K está de acordo com a geologia local, onde a formação rochosa é composta por granito/gnaiss com pontos de cobertura sedimentar, ambos ricos em feldspato potássico.

Em relação às análises das águas dos poços de abastecimento, observou-se, em todos os casos, quantidades abaixo do limite para intervenção mitigatória de consenso internacional (100 Bq/m^3). Entretanto, 7 dos 9 poços estudados apresentaram valor de dose efetiva comprometida para ingestão e inalação de água potável acima da referência estipulada pela OMS (0,1 mSv/ano). Os valores excedentes variaram de 0,106 a 0,385 mSv/ano .

Este trabalho está em consonância com a preocupação federal acerca dos requisitos básicos de radioproteção em território brasileiro, materializada no projeto de norma NN 3.01 da CNEN, o qual foi publicado em março de 2024.

Tal levantamento também contribui com a aquisição de dados radiométricos – ainda escassos – na região sul do país e possui relevância social imediata, na medida em que fornece tanto a informação à comunidade científica quanto a possibilidade de intervenção mitigatória às partes interessadas, a fim de minimizar o risco de desenvolvimento de câncer nos moradores da região.

Neste sentido, faz-se necessário a varredura de mais propriedades na região, onde foram encontradas altas concentrações de Rn nas águas subterrâneas. Outra sugestão de pesquisa futura é a avaliação radiométrica da água mineral amplamente comercializada em território nacional extraída e engarrafada nas proximidades dessa localidade.

A principal limitação encontrada no levantamento foi a barreira comunicacional com os residentes locais, fato que impossibilitou uma maior amostragem. Além do trânsito cordial com os proprietários, é necessário estabelecer uma relação de confiança para a execução da pesquisa, uma vez que o trabalho é realizado nas habitações. Desta maneira, é imperativo estabelecer laços prévios de comunicação e confiança para o andamento deste tipo de trabalho.

REFERÊNCIAS

- AKKAYA *et al.* Variation in the radon concentrations and outdoor gamma radiation levels in relation to different geological formations in the thermal regions of Bursa, Turkey. **Journal of Radiological Protection**, v. 36, n. 3, p. 490, 2016.
- ALONSO *et al.* Radon in groundwater of the northeastern Gran Canaria aquifer. **Water**, v. 7, n. 6, p. 2575-2590, 2015.
- AL-ZOUGHLOO, M.; KREWSKI, D. Health effects of radon: a review of the literature. **International journal of radiation biology**, v. 85, n. 1, p. 57-69, 2009.
- ATOMTEX. **Spectrometric backpack-based radiation detector AT6101C (gamma and neutron)**. Minsk, 2018. 37 p.
- BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná. Programa geologia, mineração e transformação mineral, Curitiba: SGB-CPRM, 2021. 1 Mapa colorido, 235 x 90 cm. Escala 1:600.000.
- BONOTTO, D. M. **Radioatividade nas águas: Da Inglaterra ao Guarani**. São Paulo: Editora UNESP, 2004.
- BUCHLI, R.; BURKART, W. Correlation among the terrestrial gamma radiation, the indoor air ^{222}Rn , and the tap water ^{222}Rn in Switzerland. **Health physics**, v. 57, n. 5, p. 753-759, 1989.
- CANBAZOĞLU *et al.* Assessment of natural radioactivity in Elaziğ region, eastern Turkey. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**. 292. 10.1007/s10967-011-1485-0, 2011.
- CHAO *et al.* Background radiation in the production area of hokutolite in Taiwan. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 172, p. 108769, 2020.
- CLARK *et al.* Computer Simulation of an Airborne Gamma ray Spectrometer. **Journal of Geophysical Research**, v. 77, n. 17, 3021-3031, 1972.
- CLEVER, H.L. Solubility Data Series, Krypton, Xenon, Radon Gas Solubilities. **Pergamon press**, v. 2, p. 463-468, 1985.
- 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.
- CORRÊA *et al.* Measurements of ^{222}Rn activity in well water of the Curitiba metropolitan area (Brazil). **Radiation Physics and Chemistry** (1993), v. 104, p. 108-111, 2014.
- CORREA, R.T. 2019. Mapa da anomalia radiométrica do Brasil (terceira edição). Escala 1:5.000.000. Brasília, SGB-CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

CURIE, M. Radium and the New Concepts in Chemistry, 1911. **The Nobel Prize**. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1911/marie-curie/lecture/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

DARKO *et al.* Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 138, n. 1, p. 45-51, 2010.

DIONÍSIO, P. H. Albert Einstein e a física quântica, **Caderno brasileiro de ensino de física**, v. 22, n. 2, p. 147-164, 2005.

EPA-US. Environmental Protection Agency of United States. **Health Risk of Radon. Exposure to Radon Causes Lung Cancer in Non-smokers and Smokers Alike**. Disponível em: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon#head>. Acesso em: 02 abr. 2024.

FAANU *et al.* Natural radioactivity levels in soils, rocks and water at a mining concession of Perseus gold mine and surrounding towns in Central Region of Ghana. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, p. 1-16, 2016.

GASIŪNAS, K.; MASTAUSKAS, A.; MORKŪNAS, G. Concentrations of indoor and soil radon in Lithuania. **Statyba**, v. 4, n. 4, p. 316-321, 1998.

GENITRON INSTRUMENTS. **AlphaGUARD portable radon monitors user manual**. Germany, 1998.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GRZYWA-CELIŃSKA *et al.* Radon — the element of risk. The impact of radon exposure on human health. **Toxics**, v. 8, n. 4, p. 120, 2020.

HEYDE, K. **Basic ideas and concepts in nuclear physics: an introductory approach**. 3 ed. Bath: Bookcraft Ltd, 1999.

IAEA. **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. IAEA-TECDOC-1363. International Atomic Energy Agency. Viena. 2003.

IARC. **Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Man-made Mineral Fibres and Radon**. IARC-MONOGRAPHS, Lyon, v. 43, 1988.

ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).

ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

JACOMINO, V. M. D. A radiação natural, *In*: Rócio G dos Reis, (Org.), NORM: Guia Prático, 1ed, SÃO PAULO: Gráfica PoloPrinter, 2016, v. 1, p. 41-59.

JONES, A. P. Indoor air quality and health. **Atmospheric environment**, v. 33, n. 28, p. 4535-4564, 1999.

- KAM, E.; BOZKURT, A. Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northern Turkey. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 65, n. 4, p. 440-444, 2007.
- KAM, E.; BOZKURT, A.; ILGAR, R. A study of background radioactivity level for Canakkale, Turkey. **Environmental monitoring and assessment**, v. 168, p. 685-690, 2010.
- KAPDAN *et al.* A study of environmental radioactivity measurements for Cankiri, Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 150, n. 3, p. 398-404, 2012.
- KAYA *et al.* Determination of the environmental natural radioactivity and mapping of natural background radioactivity of the Gumushane province, Turkey. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, p. 933-957, 2020.
- LABORATOIRE NATIONAL HENRI BECQUEREL. **Atomic and nuclear data**. Gif-sur-Yvette: CHISTÉ, V.; BÉ, M.M. 2010. Disponível em: http://www.lnhb.fr/nuclides/Rn-222_tables.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.
- LABORATOIRE NATIONAL HENRI BECQUEREL. **Atomic and nuclear data**. Surrey: NICHOLS, A. L. 2011. Disponível em: http://www.lnhb.fr/nuclides/Rn-220_tables.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.
- LIMA, P. N. Análise Bibliométrica — Conceitos, Métodos e Softwares. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2017.
- LUNARDI, M.; BONOTTO, D. M. Distribution of radioelements in rock-water-air systems from the Caldas Novas hydrothermal complex (GO), Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 130, p. 104586, 2023.
- MADZUNYA *et al.* Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa. **Heliyon**, v. 6, n. 2, 2020.
- 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.
- MARTINS, R. A descoberta da radioatividade, *In*: SANTOS, Carlos Alberto, Da Revolução Científica à Revolução Tecnológica (pp,29-49), Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 1998b
- MARTINS, R. A descoberta dos Raios X: O primeiro comunicado de Röntgen, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 20(4), 373-390, 1998a.
- MARTINS, R. V. Como Becquerel não descobriu a radioatividade, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, p, 27-45, 1990,
- MAZZILLI, B. P. Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema; Mineração de fosfato e produção de ácido fosfórico, *In*: Rócio G dos Reis, (Org.), NORM: Guia Prático, 1. ed. São Paulo: Gráfica PoloPrinter, 2016, v. 1, p. 61-72.

MCKINNEY, W. W. **Python para análise de dados: Tratamento de dados com Pandas, NumPy e IPython**. Tradução: Lúcia Kinoshita. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2018.

MEROLA, Y.; CUNHA, T. N.; SCHENKA, A. A.; NC Da Silva. Natural environmental gamma radiation exposure and prevalence of breast cancer in Poços de Caldas, MG, Brazil. **International Journal of Radiation Research**, v. 15, p. 413-418, 2017.

MORENO *et al.* Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain. **Journal of environmental radioactivity**, v. 128, p. 1-8, 2014.

MORENO *et al.* Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa. **Journal of environmental radioactivity**, v. 189, p. 1-13, 2018.

NAZAROFF, W. Radon transport from soil to air. **Reviews of geophysics**, v. 30, n. 2, p. 137-160, 1992.

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

NIRS. National Institute of Radiological Sciences. **Estudo da eficiência dos detectores CR-39**. Trabalho técnico desenvolvido pelos laboratórios de radônio do CDTN e da UTFPR em 2010.

OMIROU *et al.* In-depth study of radon in water in a Greek village with enhanced radon concentrations. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 264, p. 107210, 2023.

ÖRGÜN *et al.* Natural radioactivity levels in granitic plutons and groundwaters in Southeast part of Eskisehir, Turkey. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 63, n. 2, p. 267-275, 2005.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Manual da OMS sobre radônio em ambientes internos: uma perspectiva de saúde pública**. Edição: Hajo Zeeb e Ferid Shannoun – São Paulo, SP: 1 Ed, 2016.

PASCHUK *et al.* Mathematical model of radon activity measurements. **In**: 2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015, 2015, São Paulo, SP, Brazil. Proceedings of 2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira De Energia Nuclear - ABEN, 2015. v. 1. p. 1-7.

PEREIRA, A. J. S. C.; GODINHO, M. M.; NEVES, L. J. P. F. On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. **Journal of environmental radioactivity**, v. 101, n. 10, p. 875-882, 2010.

PORSTENDÖRFER, J. Properties and behavior of radon and thoron and their decay products in the air. **Journal of Aerosol Science**, v. 25, n. 2, p. 219-263, 1994.

RADON1. What is Radon Abatement? 2019. Disponível em: <https://radon1.com/what-is-radon-abatement/>. Acesso em: 09 nov. 2023.

RAMACHANDRAN, T. V. Background radiation, people and the environment: a review. **Editorial Committee**, v. 30, n. 1-4, p. 61, 2007.

SANKARAN PILLAI *et al.* A review on variation of natural radioactivity along the southeast coast of Tamil Nadu for the past 4 decades (1974–2016). **Radiation Protection Dosimetry**, v. 179, n. 2, p. 125-135, 2018.

SANTOS *et al.* Investigation of natural radioactivity as a possible driver of cancer incidence in Paraiba, northeastern Brazil. **Radiation protection dosimetry**, v. 178, n. 1, p. 112-115, 2018.

SHIVANANDAPPA, K. C.; YEROL, N. Radon concentration in water, soil and sediment of Hemavathi River environments. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 5, p. 587-596, 2018.

SILVA *et al.* Radiometric analysis of Brazilian commercial ornamental stones. **Applied Radiation and Isotopes**, p. 111020, 2023.

SUJO *et al.* Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico. **Journal of environmental radioactivity**, v. 77, n. 2, p. 205-219, 2004.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Annex B, 1977. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects**, Annex D, 1982. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

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

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

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation**, Annex B, 2019. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation**, Annex D, 2020. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency (EPA), 2014. **Basic Information about Radon in Drinking Water**. Disponível em:

<https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/basicinformation-2.html>. Acesso em: 31, ago de 2023.

URBAN, M.; PIESCH, E. Low Level Environmental Radon Dosimetry with a Passive Track Etch Detector Device. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 1, n. 2, p. 97-109, 1981.

WANG, Z. Natural radiation environment in China. *In: International congress series*. Elsevier, 2002. p. 39-46.

WHO. World health organization. **Guidelines for drinking-water quality**. 4 ed. Geneva, 2011.

WHO. World health organization. **Management of radioactivity in drinking-water**. Geneva, 2018.

WHO. World Health Organization. Radon. 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>. Acesso em: 25 jan. 2024.

YARAR, Y.; GÜNAYDI, T.; ÇELEBI, N. Determination of radon concentrations of the Dikili geothermal area in western Turkey. **Radiation protection dosimetry**, v. 118, n. 1, p. 78-81, 2006.

ZHAO, Y.; ZHANG, Z.; FENG, W. **Toxicology of Nanomaterials**. 1 ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2016.

ŽUNIĆ *et al.* High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niška Banja (Balkan region). **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 89, n. 3, p. 249-260, 2006.

**APÊNDICE A - CÓDIGO EM LINGUAGEM PYTHON PARA TRATAMENTO DOS
DADOS DE ESPECTROMETRIA GAMA SUPERFICIAL (EQUIPAMENTO AT6101C
ATOMTEX)**

CÓDIGO EM LINGUAGEM PYTHON PARA TRATAMENTO DOS DADOS DE ESPECTROMETRIA GAMA SUPERFICIAL (EQUIPAMENTO AT6101C ATOMTEX)

```

import pandas as pd
import folium

def ler_e_processar_arquivos(caminhos_dos_arquivos):
    dados_concatenados = pd.DataFrame()

    for caminho_do_arquivo in caminhos_dos_arquivos:
        dados = pd.read_csv(caminho_do_arquivo, sep='\t', header=None)
        dados = dados.rename(columns={0: 'contagem', 3: 'latitude', 4:
'longitude'})
        colunas_para_excluir = [1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,
14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]
        dados = dados.drop(columns=colunas_para_excluir, axis=1)
        dados = dados[(dados['contagem'] != 0) & (dados['latitude'] !=
0) & (dados['longitude'] != 0)]
        dados_concatenados = pd.concat([dados_concatenados, dados],
ignore_index=True)

    return dados_concatenados

caminhos_dos_arquivos = ['arquivo1.txt', 'arquivo2.txt',
'arquivo3.txt', 'arquivo4.txt']

dados_processados = ler_e_processar_arquivos(caminhos_dos_arquivos)

dados_processados['radius'] = dados_processados['contagem'] /
dados_processados['contagem'].max() * 10

def calcular_cor(contagem, min_contagem, max_contagem):
    valor_normalizado = (contagem - min_contagem) / (max_contagem -
min_contagem)
    r = int(valor_normalizado * 255)
    g = 0
    b = int((1 - valor_normalizado) * 255)
    return f"#{r:02x}{g:02x}{b:02x}"

mapa = folium.Map(location=[dados_processados['latitude'].mean(),
dados_processados['longitude'].mean()], zoom_start=12, tiles='Stamen
Terrain')

for _, row in dados_processados.iterrows():
    cor = calcular_cor(row['contagem'],
dados_processados['contagem'].min(),
dados_processados['contagem'].max())
    folium.CircleMarker(
        location=[row['latitude'], row['longitude']],

```

```

        radius=row['radius'],
        color=None,
        fill=True,
        fill_color=cor,
        fill_opacity=0.6,
        popup=f"Contagem: {row['contagem']}"
    ).add_to(mapa)

min_contagem = dados_processados['contagem'].min()
max_contagem = dados_processados['contagem'].max()
escala_cores_html = f"""
<div style="
    position: fixed;
    top: 10px;
    left: 50%;
    transform: translateX(-50%);
    width: 250px;
    height: 40px;
    background-color: rgba(255,255,255,0.7);
    z-index:9999;
    padding: 10px;
    border-radius: 10px;
">
    <div style="float:left; width: 10%; height: 20px; background-color:
blue;"></div>
    <div style="float:left; width: 80%; height: 20px; background:
linear-gradient(to right, blue, red);"></div>
    <div style="float:right; width: 10%; height: 20px; background-
color: red;"></div>
    <div style="float:left; margin-left: 5px; color: blue; text-shadow:
-1px -1px 0 #fff, 1px -1px 0 #fff, -1px 1px 0 #fff, 1px 1px 0
#fff;">{min_contagem}</div>
    <div style="float:right; margin-right: 5px; color: red; text-
shadow: -1px -1px 0 #fff, 1px -1px 0 #fff, -1px 1px 0 #fff, 1px 1px 0
#fff;">{max_contagem}</div>
</div>
"""
mapa.get_root().html.add_child(folium.Element(escala_cores_html))

folium.TileLayer(tiles='https://mt1.google.com/vt/lyrs=s&x={x}&y={y}&z=
{z}', attr='Google Maps', name='Google Maps',
overlay=True).add_to(mapa)

mapa.save("mapa_satelite_personalizado.html")

mapa

```