



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais

Área de Concentração: Gestão dos Recursos Naturais
Linha de Pesquisa: Saneamento Ambiental

RAYSSA DE LOURDES CARVALHO MARINHO DO RÊGO CATÃO

**AVALIAÇÃO DO RISCO RADIOATIVO POR NÍVEIS DE RADÔNIO-
222 NO AR DE GARIMPOS E AMBIENTES INTERNOS DE
RESIDÊNCIAS NO SERIDÓ PARAIBANO**

CAMPINA GRANDE-PB

2022

RAYSSA DE LOURDES CARVALHO MARINHO DO RÊGO CATÃO

**AVALIAÇÃO DO RISCO RADIOATIVO POR NÍVEIS DE RADÔNIO-
222 NO AR DE GARIMPOS E AMBIENTES INTERNOS DE
RESIDÊNCIAS NO SERIDÓ PARAIBANO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais (PPGERN), para obtenção do título de Doutor(a).

Orientadora: Prof.^a Patrícia Hermínio Cunha Feitosa

Coorientadora: Prof.^a Andréa Carla Lima Rodrigues

CAMPINA GRANDE-PB

2022

C357a

Catão, Rayssa de Lourdes Carvalho Marinho do Rêgo.

Avaliação do risco radioativo por níveis de radônio-222 no ar de garimpos e ambientes internos de residências no Seridó paraibano / Rayssa de Lourdes Carvalho Marinho do Rêgo Catão – Campina Grande, 2023.

134 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Patrícia Hermínio Cunha Feitosa, Profa. Dra. Andréa Carla Lima Rodrigues."

Referências.

1. Radioatividade. 2. Câncer. 3. Contaminação. 4. Radônio-222. 5. Saúde. 6. Garimpo. 7. Risco Radioativo. 8. Águas Subterrâneas. I. Feitosa, Patrícia Hermínio Cunha. II. Andréa Carla Lima Rodrigues III. Título.

CDU 539.16(043)

RAYSSA DE LOURDES CARVALHO MARINHO DO RÊGO CATÃO

**AVALIAÇÃO DO RISCO RADIOATIVO POR NÍVEIS DE RADÔNIO-222 NO AR
DE GARIMPOS E AMBIENTES INTERNOS DE RESIDÊNCIAS NO SERIDÓ
PARAIBANO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais (PPGERN), para obtenção do título de Doutor(a).

Aprovado(a) em: ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. PATRÍCIA HERMÍNIO CUNHA FEITOSA
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof^ª. Dra. ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof^ª. Dra. DAYSE LUNA BARBOSA
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. JOSÉ ARAÚJO DOS SANTOS JÚNIOR
Universidade Federal do Pernambuco (UFPE)

Prof^ª Dra. ELISSANDRA MOURA LIMA
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO/TESE

Ata da **DÉCIMA** sessão pública de **Defesa de Tese** do Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais – PPGEGRN do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Ao 17 dia do mês de MAIO de 2023, às **14:00** horas, reuniu-se em forma e Termos do Art. 62 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação “Stricto Sensu” da UFCG e do Regulamento do Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Resolução 02/2019 do Colegiado Pleno do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão – CONSEPE/UFCG, a Banca Examinadora composta pelos professores/pesquisadores Prof.(a) Dr.(a) **Patrícia Hermínio Cunha Feitosa/UFCG**, como orientador(a) principal; Prof.(a.) Dr.(a.) **Andréa Carla Lima Rodrigues**, como co-orientador; Prof.(a.) Dr.(a.) **Dayse Luna Barbosa/UFCG** como membro interno; Prof.(a.) Dr.(a.) **Madson Tavares Silva/UFCG** como membro interno; Prof.(a.) Dr.(a) **José Araújo dos Santos Júnior/UFPE**, como membro externo; Prof.(a.) Dr.(a) **Elissandra Moura Lima /UFCG**, como membro externo; , a qual foi constituída pela Portaria **PPGEGRN 22/2023** da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, juntamente com **Sr(a) Rayssa de Lourdes Carvalho Marinho do Rêgo Catão** candidato(a) ao Grau de **Doutor(a)** em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais. Abertos os trabalhos, o(a) Senhor

(a) Presidente da Banca Examinadora, Prof.(a.) Dr(a). **Patrícia Hermínio Cunha Feitosa/UFCG**, anunciou que a sessão tinha a finalidade de julgamento da apresentação e de defesa da Tese sob o título: **“AVALIAÇÃO DO RISCO RADIOATIVO POR NÍVEIS DE RADÔNIO-222 NO AR DE GARIMPOS E AMBIENTES INTERNOS DE RESIDÊNCIAS NO SERIDÓ PARAIBANO”** Área de Concentração: : **Gestão dos Recursos Naturais**, orientada pelo(a) Professor(a) Dra . **Patrícia Hermínio Cunha Feitosa/UFCG**. O(A) presidente concedeu à palavra o(a) candidato(a) para, no prazo de tempo estipulado, efetuar a apresentação de seu trabalho. Concluída a exposição do(a) candidato(a), o(a) Presidente iniciou a segunda etapa do processo de defesa passando a palavra a cada membro da Banca Examinadora para as devidas considerações, correções e arguição do(a) candidato(a). Em seguida, a Banca Examinadora solicitou a saída dos presentes para, em sessão secreta, avaliar a apresentação

e defesa. Após chegar a uma decisão final, a Banca Examinadora solicitou o retorno da Assembléia e anunciou, de conformidade com o que estabelece o Art.57 do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, o Conceito **APROVADO**, o qual será atribuído após O(a) candidato(a), no prazo máximo de 30 dias, efetuar as correções e modificações sugeridas e aprovadas pela Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar pelo Coordenador, pelo candidato e pelos membros da Banca Examinadora.

Campina Grande,
17/05/2023.

Assinaturas:

Coordenadora do PPGEGRN _____

Candidato(a) _____

Presidente _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____



Documento assinado eletronicamente por **PATRICIA HERMINIO CUNHA FEITOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em

11/06/2023, às 21:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DAYSE LUNA BARBOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/06/2023, às

09:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em

13/06/2023, às 13:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MADSON TAVARES SILVA, PROFESSOR**, em 21/06/2023, às 09:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIA DE FATIMA MARTINS, COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 12/07/2023, às 14:57,

conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ ARAÚJO DOS SANTOS JÚNIOR, Usuário Externo**, em 13/07/2023, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ELISSANDRA NASCIMENTO DEMOURA LIMA, COORDENADOR(A)**, em 17/07/2023, às 13:59, conforme

horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEInº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAYSSA DE LOURDES CARVALHO MARINHO DO RÊGO CATÃO, Usuário Externo**, em 09/09/2023, às 14:20, conforme

horário oficial de Brasília, com fundamentono art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador**3356061** e o código CRC **5BA63C2B**.

Referência: Processo nº 23096.032377/2023-14
3356061

SEI nº

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por me permitir viver esse dia.

Agradeço a mim mesma por não ter me permitido desistir diante das adversidades.

Agradeço ao meu filho William Pedro Catão por cada beijinho e carinho que me ajudaram a chegar aqui.

Agradeço ao meu esposo Wênio Catão por todo amor e por nunca largar a minha mão.

Agradeço aos anjos que são as minhas orientadoras Prof.(a) Dra. Patrícia Hermínio Cunha Feitosa e Prof.(a) Dra. Andrea Carla Lima Rodrigues por todos os ensinamentos e por serem pessoas tão humanas, generosas e carinhosas. Agradeço também, por toda caminhada que me acompanharam, me ensinaram e me apoiaram. Confesso que tento todos os dias, enquanto profissional, me espelhar em vocês. Muito obrigada!

Agradeço aos agentes de saúde dos municípios de Picuí-PB e Nova Palmeira-PB, como também a gestão municipal dos municípios, que foram essenciais para que essa pesquisa acontecesse.

Agradeço aos Professores doutores, José Araújo dos Santos Júnior, Dayse Luna Barbosa, Elissandra Moura Lima e Madson Tavares Silva que contribuíram através da banca examinadoras desse trabalho, por todo conhecimento repassado.

Agradeço novamente ao Prof. Dr. José Araújo Dos Santos Júnior pelo auxílio de orientações e materiais técnicos fornecidos na área de radioecologia e radônio 222, os quais foram determinantes no meu aprendizado sobre a temática.

Agradeço a Universidade Federal de Campina Grande, ao Laboratório de Saneamento da UFCG, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais pelo apoio e fomento à pesquisa.

E por fim, agradeço mais uma vez a Deus pela minha família.

RESUMO

Os seres humanos sempre estiveram expostos as fontes naturais de radiação ionizantes, que incluem os raios cósmicos, radionuclídeos cosmogênicos e principalmente, os radionuclídeos primordiais e seus descendentes. O radônio, especificamente o isótopo ^{222}Rn produto de decaimento da série do ^{238}U , apresenta maior relevância para dosimetria de ambientes internos, contribuindo, em média, com quase 54% da exposição mundial derivada da radioatividade natural. Ao ser ingerido e principalmente quando inalado, pode apresentar potencial risco determinístico para os seres vivos. No Nordeste brasileiro, mais precisamente no Seridó paraibano, existe predominância de formações geológicas pegmatíticas, que podem conter ocorrências de urânio e configurar risco devido à emissão do ^{222}Rn . Neste contexto, esta pesquisa objetiva avaliar o risco radioativo por níveis de radônio-222 no ar e doses efetivas em ambientes internos nos municípios de Picuí-PB e Nova Palmeira-PB. O monitoramento foi realizado com auxílio de dosimetria passiva fazendo uso de detector alfa, modelo Corentium Home. O arranjo experimental para medida de radônio foi definido em ambientes internos de permanência prolongada e em locais que tenham pontos de água, como banheiro e cozinha, sempre posicionando o aparelho a uma altura variável do piso de $0,90\text{m} < h < 1,50\text{m}$. Também foram realizadas medições em minas de extração de recursos minerais. Paralelamente, foi aplicado um questionário visando identificar possíveis parâmetros e hábitos que possam ser correlacionados com os resultados da pesquisa. Modelos estatísticos descritivos foram utilizados para tratamento dos dados e inferência sobre a situação radiométrica dos municípios. Foram identificadas concentrações de ^{222}Rn no ar do Seridó oriental paraibano, mas em baixos níveis. O risco radioativo decorrente da exposição ao ^{222}Rn em ambientes internos na população residente em Picuí e Nova Palmeira variaram de 0,0 a 31,82 Bq/m³, sendo a estimativa da média de gás radônio e seus descendentes cinco vezes menor do que o limite máximo de 100 Bq/m³ estipulado pela WHO. Foi verificado que os cômodos que faziam uso de água em seu ambiente interno, banheiro e cozinha, apresentaram maiores concentrações de ^{222}Rn no ar. O uso da água em ambientes internos foi identificado como variável indispensável na análise de radônio 222 em locais fechados. Com relação as fontes de água, foi encontrada uma correlação positiva entre o uso de águas subterrâneas e maiores concentrações de ^{222}Rn no ar, sendo um forte indicativo da presença de radônio nas águas subterrâneas de Picuí-PB e Nova Palmeira-PB. Nas demais fonte avaliadas, não foi encontrado correlação com o ^{222}Rn . A dosimetria calculada para a área de estudo, foi enquadrada no nível background, sendo menor do que o limite permitido pela UNSCEAR, 2000. O risco para obter câncer de pulmão no Seridó oriental paraibano devido a inalação do ^{222}Rn foi de 8,1 habitantes a cada 1 milhão de pessoas residentes no período de um ano na área, sendo abaixo da média mundial que é de 170 a 230 por milhões de pessoas, por ano. Com relação ao ^{222}Rn no ar, só foi possível correlacionar com o câncer de pulmão. Nos garimpos do Seridó oriental paraibano todas as leituras radiométricas indicaram baixas concentrações de ^{222}Rn , e isso pôde ser justificado por serem ambientes superficiais e ventilados, sem riscos para a saúde dos garimpeiros.

Palavras-chave: câncer; contaminação; radioatividade; saúde; garimpo.

ABSTRACT

Human beings without their exhibited or exposed as natural sources of exposure, which include cosmic rays, cosmogenic radionuclides and mainly radionuclides and mainly radionuclides. Radon 2, specifically the ^{222}Rn series decay product, has the highest² is for dosimetry in watchful environments, on average, with nearly 54% of the world's exposure derived from natural radioactivity. When ingested and especially when inhaled, it may present a deterministic potential risk to living beings. In the Brazilian Northeast, more precisely in the Seridó of Paraíba, there is a predominance of pegmatitic geological formations, which contain occurrences of uranium and risk configuration due to the emanation of ^{222}Rn . In this context, this research objectively evaluates the radioactive risk resulting from exposure to radon and exposure in indoor environments in the population in the eastern Seridó of Paraíba, with a strong influence of the analysis on its local economy. Monitoring was performed with the aid of passive dosimetry using an alpha detector, model Corentium Home. The experimental arrangement for measuring floor variation was defined in indoor environments for prolonged stay in places that have water points, bathroom and kitchen, always positioning the device at a floor height, $90\text{ m} < 1.50\text{ m}$. Research has also been carried out in resource transport mines. At the same time, a lemma defining parameters and habits that can be correlated with the research results was applied. Descriptive statistical models were used for data processing and inference about the radiometrics of the municipalities. ² They were found in ^{222}Rn of the eastern Seridó of Paraíba, but at low levels. The radioactive current from exposure to ^{222}Rn in indoor environments in the population residing in Picuí and Nova Palmeira ranged from 0.0 to 31.82 Bq/m^3 , being a prognosis of the average of raon gas and its descendants five times lower than the maximum limit of 100 Bq/m^3 stipulated by the WHO. It was verified that the rooms that used water in their internal environment, bathroom and kitchen, were verified in the ^{222}Rn . The use of water in internal environments was identified as an indispensable variable in the analysis of radionium 222 indoors. With good and positive water sources for water sources, a strong presence of water was found, being a strong in the waters of Picuí-PB, being a new Palmeiras de Picuí-PB. In the other sources found, the ² was not verified with. The dosimetry, for the protection allowed for the study area at the background level, being less than the cancer limited to the UNSCEAR background. per 1 million people residing in the area for one year, below the world average of 170 to 230 per million people per year. With ^{222}Rn in the air, it was possible to correlate with soccer-only cancer. In the eastern Seridó of Paraíba, all radiometrics indicated loss of miners, and this can be explained by the fact that they are miners and ventilated, without health risks.

Keywords: cancer; Contamination; radioactivity; health; mine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Decaimento radioativo do Urânio 238 até a sua forma estável.....	16
Figura 2- Cadeia de decaimento do urânio 238, tempo de meia vida dos elementos e onde são encontrados.....	17
Figura 3- Causas de infiltração do radônio em edificações.....	18
Figura 4- Limites propostos por organizações mundiais para o radônio 222 no ar.....	22
Figura 5- Limites propostos por organizações mundiais para o Radônio 222 para a água.....	23
Figura 6- Organizações mais citadas na literatura quanto aos limites de radônio 222 na água e no ar nos artigos avaliados.....	26
Figura 7- Perfil de rocha com a ocorrência de diques.....	28
Figura 8- Bloco diagrama de um pegmatito.....	29
Figura 9- Localização das três províncias pegmatíticas brasileiras.....	30
Figura 10- Localização do Seridó Paraibano Oriental.....	32
Figura 11- Contexto geológico da Província Pegmatítica do Seridó e da Faixa Seridó com a localização dos principais.....	33
Figura 12- A- Extração de minérios no Município de Picuí com garimpeiros sem o uso de EPs.....	36
Figura 12- B- Alojamento insalubre dos garimpeiros em Picuí-PB.....	36
Figura 13- Áreas de mineração no Seridó Paraibano.....	36
Figura 14- Localização dos garimpos ativos e inativos da cidade de Picuí-PB.....	37
Figura 15- Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu.....	38
Figura 16-A- Caixas d'água em locais públicos para distribuição de água para a população.....	39
Figura 16-B- Fila de baldes para coleta de água.....	39
Figura 17- Municípios vizinhos; Nova Palmeira, Picuí e Pedra Lavrada localizados no Seridó Paraibano.....	41
Figura 18- Corentium Home Radon Detector.....	42
Figura 19- Divisão de zonas na cidade de Picuí para análise do radônio 222 no ar.....	46
Figura 20- Zona única na cidade de Nova Palmeira para análise do radônio 222 no ar.....	46
Figura 21 A- Zona única na cidade de Nova Palmeira para análise do radônio 222 no ar.....	47
Figura 21 B- Zona única na cidade de Nova Palmeira para análise do radônio 222 no ar.....	47
Figura 22- Esquema do rodízio nos locais avaliados por agentes de saúde e endemias	48

Figura 23- Açudes com perímetro não habitado no município de Nova Palmeira-PB.....	49
Figura 24- Açude Jandovi localizado em Picuí-PB.....	50
Figura 25- Casas avaliadas próximas do Açude Jandovi.....	50
Figura 26- Localização do Açude Várzea grande em Picuí-PB.....	51
Figura 27- Disposição das regiões no entorno do açude Várzea Grande.....	52
Figura 28 - Gráfico Q-Q: avaliação de medidas de dispersão de assimetria e curtose.....	59
Figura 29- Influência das fontes de água nas concentrações de ^{222}Rn no ar.....	61
Figura 30 - Comparação de médias de ^{222}Rn no ar nos locais que faziam uso de água subterrânea.....	62
Figura 31 - Histogramas que correlacionam consumo de água e concentrações de ^{222}Rn no ar.....	63
Figura 32- Avaliação do ^{222}Rn no ar nos quartos próximos ao Açude Jandovi.....	65
Figura 33 - Influência dos materiais de construção nas alvenarias nas concentrações de ^{222}Rn no ar.....	67
Figura 34- Acabamento da alvenaria nas residências dos entrevistados.....	68
Figura 35- Tempo de moradia dos entrevistados.....	68
Figura 36- Fluxograma dos entrevistados que possuíam neoplasia.....	69
Figura 37- Fluxograma dos familiares dos entrevistados que possuíam neoplasia.....	70
Figura 38- Garimpo morro das panelas no município de Picuí-PB.....	71
Figura 39- Garimpo morro do cuscuz no município de Picuí-PB.....	72
Figura 40- Adaptação do abrigo para leitura do ^{222}Rn em Garimpos.....	72
Figura 41 - Desenvolvimento de doenças relacionadas ao número de horas diárias trabalhadas na mineração.....	73
Figura 42 - Gráfico de dispersão entre a quantidade de horas trabalhadas diariamente e o número de doenças desenvolvidas pelos mineradores.....	74
Figura 43 - Equipamentos de Proteção Individual utilizados pelos mineradores.....	75
Figura 44 – Gráfico de dispersão entre a quantidade de EPIs utilizados e o número de doenças desenvolvidas pelos mineradores.....	76
Figura 45- Espacialização do ^{222}Rn no ar no município de Picuí-PB.....	77
Figura 46- Espacialização do ^{222}Rn no ar no município de Nova Palmeira-PB.....	78
Figura 47- Modelo construtivo comum nas edificações avaliadas da área de estudo.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo das concentrações recomendadas e máximas de radônio 222 nas legislações de países e organizações.....	24
Tabela 2- Concentrações de radônio 222 no ar no Brasil.....	27
Tabela 3- Incidência de morte por câncer de estômago em uma série histórica de 20 anos....	40
Tabela 4- Cidades localizadas no Seridó paraibano com formações pegmatíticas.....	41
Tabela 5: Número de residências para cada região.....	52
Tabela 6- Parâmetros utilizados para o cálculo das amostras.....	53
Tabela 7 - Descrição das amostras que foram avaliadas na pesquisa.....	54
Tabela 8 - Análise descritiva das concentrações de ²²² Rn avaliados.....	57
Tabela 9 - Assimetria, Curtose e Teste de Normalidade da concentração de radônio.....	58
Tabela 10 – Resultados dos testes não paramétricos (Mann Whitney e Kruskal-Wallis) para a concentração de radônio.....	60
Tabela 11- Dados das residências próximas aos reservatórios superficiais.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cooperativas de Mineração nos municípios avaliados.....	33
Quadro 2 - Minerais extraídos e vendidos pelas cooperativas do Seridó.....	33
Quadro 3 - Orientações prévias dadas aos moradores para uso do aparelho Corentium Home Radon Detector.....	45
Quadro 4 . Garimpos que foram avaliados ^{222}Rn no ar.....	51
Quadro 5 - Grupos aos quais foram aplicados os questionários... ..	54
Quadro 6 - Cooperativas dos municípios do Seridó Oriental Paraibano.....	55
Quadro 7 - Fatores externos que foram avaliados para ocorrência de variação na concentração ^{222}Rn	56
Quadro 8 - Descrição das respostas dos entrevistados de variáveis que poderiam gerar câncer.....	66
Quadro 9 – Resumo das correlações entre o ^{222}Rn e as variáveis analisadas.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AESA- Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
- ANA- Agência Nacional de Águas
- CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear
- CNPR- Conselho Nacional de Proteção Radiológica
- CPRM- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil
- IAEA- International Atomic Energy Agency
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICRP- International Commission on Radiological Protection
- ISSO- International Organization For Standardization
- NCRP- Conselho Nacional de Medidas e Proteção Raiológica
- UFPE- Universidade Federal de Pernambuco
- UNSCEAR- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
- US-EPA United States Environmental Protection Agency
- US EPA- Agencia dos Estados Unidos de Proteção Ambiental
- ²²²Rn- Radônio 222

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.....	2
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO/TESE	2
1.0 INTRODUÇÃO	11
1.1 HIPÓTESES	13
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
2.0 -FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Radiações ionizantes e não ionizantes	14
2.2 - Radônio 222 e fatores que influenciam a sua concentração e transporte.....	16
2.3- Padrões internacionais para as concentrações de ²²²Rn no ar e na água.....	18
2.3 Concentrações de radônio 222 no Brasil.....	25
2.5 Ocorrência de radônio em pegmatitos	27
2.5.1 Importância econômica dos pegmatitos	28
3.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
3.1 Geologia do Seridó paraibano	31
3.2 Caracterização dos Recursos Minerais dos municípios avaliados no Seridó Paraibano ...	33
3.3 Caracterização dos Recursos Hídricos no Seridó Paraibano	37
3.4 Caracterização da ocorrência de câncer de estômago no Seridó paraibano	39
4.0 METODOLOGIA	41
4.1 Etapas da pesquisa	41
4.2 Classificação da pesquisa.....	74
4.2.1 Sistema de medidas e monitoração do radônio	74
4.3 Cálculo amostral e espacialização dos pontos para avaliação da concentração de ²²²Rn no ar	79
4.3.1 Espacialização das residências avaliadas nas zonas urbana e rural.....	79
4.3.2 Espacialização dos pontos de coleta nos garimpos	83
4.3.3 Detalhamento do cálculo amostral.....	83
4.4 Elaboração e aplicação de questionário	86
4.5 Análise estatística dos resultados.....	87
5.0 RESULTADOS.....	88
5.1 Avaliação dos níveis de ²²²Rn no ar dos cômodos das unidades habitacionais de Picuí e Nova Palmeira com aplicação de método estatístico paramétrico	88
5.2 Avaliação dos níveis de ²²²Rn no ar Seridó oriental paraibano com aplicação de método estatístico não-paramétrico.	92

5.2.1	- Relação das fontes de água utilizadas e ^{222}Rn no ar	93
5.2.2	-Análise da influência dos açudes nas concentrações de radônio 222	96
5.2.3	Questionário: Fonte de água e ^{222}Rn	98
5.3	Materiais de construção e ^{222}Rn	99
5.3.1	Questionário: Materiais de construção e Rn^{222}	100
5.4	Avaliação dos garimpos no Seridó paraibano	103
5.5	Mapeamento das concentrações de ^{222}Rn no ar em Picuí e Nova Palmeira.....	109
5.6	Dose efetiva	111
6.0	ANÁLISE GLOBAL	113
7.0	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	116
7.1	Recomendações para trabalhos futuros.....	117
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	118

1.0 INTRODUÇÃO

Em qualquer civilização humana, o termo “emissão de radiação” causa temor e desconfiança, sendo muitas vezes associado às atividades antrópicas, como tratamento radioterápico e usinas nucleares.

No entanto, os seres humanos também podem estar expostos a radiações ocasionadas por fontes naturais. A maior parte da radiação ionizante presente na Terra é gerada através do meio ambiente. Essa exposição é denominada de radiação natural e caracterizada por ser a principal fonte de exposição para população mundial (UNSCEAR, 2008; THU *et al.*, 2019). Existem dois tipos de radiação natural, a cósmica advinda do sistema solar que contribui com 16% do total da exposição e a terrestre, responsável por 84% da absorção (CINELLI *et al.*, 2019). Porém mais da metade dessa radiação natural terrestre é gerada pelo elemento denominado de radônio (SILVA *et al.*, 2021).

Mesmo sendo originária de materiais advindos da crosta da Terra, a radiação terrestre, pode permear para meios distintos, como materiais de construção, ar, água, comida e o próprio corpo humano, todos através do uso dos recursos naturais (SURESH *et al.*, 2021).

Entre os elementos que emitem radiação terrestre estão as séries naturais do Tório 232 (^{232}Th), Urânio 235 (^{235}U) e Urânio 238 (^{238}U). O urânio é encontrado em solos e rochas, a exemplo da fosfática que obtém elevada quantidade de radionuclídeos naturais terrestres (UNSCEAR, 2000). O urânio está presente na hidrosfera, biosfera, atmosfera e litosfera com amplas variações de nível desde a formação do planeta (GARCÊZ, 2020). É um metal radioativo de ocorrência natural, que quando ingerido em alimentos líquidos ou sólidos, acumula-se preferencialmente no fígado, rins e ossos, onde tem potencial para induzir câncer (KEITH *et al.*, 2022).

O urânio natural, encontrado na forma sólida, pode contaminar o solo e a água. Outros elementos radioativos estão presentes na natureza na forma gasosa, esses apresentam grande potencial de difusão, podendo alcançar áreas extensas em curto espaço de tempo (SANTOS, 2018).

A qualidade do ar é uma característica que interfere diretamente na saúde de uma população. Ao inalar agentes tóxicos o ser humano pode desenvolver várias patologias no sistema respiratório, inclusive o câncer.

O radônio (^{222}Rn) é um gás radioativo que não possui cheiro e nem cor, formado pelos decaimentos das séries radioativas (THABAYNEH, 2015; ABUELHIA 2017; NOVERQUES *et al.*, 2020). O principal isótopo, ^{222}Rn , derivado diretamente do ^{226}Ra da série do ^{238}U , possui

um tempo de meia-vida física de 3,82 dias e ao ser ingerido ou inalado, pode ocasionar danos aos tecidos e órgãos do corpo (UNSCEAR, 2000; ČUJIĆ *et al.*, 2021).

Segundo Eidy *et al.*, (2021), nos Estados Unidos de 9% a 13% dos casos de câncer de pulmão são causados pela exposição ao radônio. No Brasil já houve o registro, através de vários estudos científicos, de altas concentrações de ^{222}Rn e seus descendentes no ar, sendo considerado um dos países com maior ocorrência deste elemento radioativo (MOREIRA *et al.*, 2018; DANTAS *et al.*, 2019; MUJALLI *et al.*, 2021).

Algumas formações geológicas são fortes indicadores da presença de urânio e consequentemente do radônio, como as rochas pegmatíticas (CPRM, 2002). Na Paraíba, especificamente na região do Seridó, a formação geológica coincide com alguns elementos rochosos encontrados nas cidades brasileiras de Poços de Caldas e Rio de Janeiro, nas quais já foram identificadas ocorrências uraníferas e evidenciado radônio no ar dos ambientes internos.

Na fronteira entre o Rio Grande do Norte e a Paraíba, mais precisamente na faixa territorial que dá continuidade a extensão do Seridó Paraibano e Potiguar, Chaves *et al.* (2016) e Marcon *et al.* (2017) publicaram estudos científicos que constataram a contaminação da água por radiação natural. Em algumas cidades dessa localidade, a exemplo de Lucrécia e Parelhas, a contaminação ocorre pelo contato das rochas com a água de reservatórios superficiais e no ar nas proximidades da ocorrência de pepitas de urânio (CHAVES *et al.*, 2016; MARCON *et al.*, 2017). No município de São José de Espinharas-PB também já houve registro de radiação natural registrada na literatura científica com contaminação por radiação natural (SANTOS, 2018). Tal constatação associada à proximidade territorial reforça uma hipótese da existência de níveis diferenciados de ^{222}Rn no ar do Seridó paraibano.

Uma vez que o ^{222}Rn também pode estar dissolvido na água, outro dado alarmante é o elevado índice de óbitos por câncer de estômago em cidades do Seridó paraibano. De acordo com a análise de uma série histórica de vinte anos, nas cidades paraibanas Picuí e Pedra Lavrada, os índices de ocorrência de óbitos por câncer de estômago são, aproximadamente, três vezes maiores do que a média nacional e a do estado da Paraíba (DATASUS, 2019).

Diante do exposto, é evidente a necessidade de avaliar as concentrações de ^{222}Rn no ar do Seridó paraibano, identificando se estão de acordo com os padrões orientados pela Organização Mundial da Saúde e os possíveis riscos à saúde pública.

1.1 HIPÓTESES

Partindo da problemática apresentada, algumas hipóteses podem ser levantadas nesta pesquisa.

- Existem níveis de ^{222}Rn no ar, em ambientes internos, acima das concentrações máximas permitidas aos municípios de Picuí e Nova Palmeira localizados no Seridó Paraibano que podem ser correlacionados com as ocorrências de câncer de estômago, pulmão e leucemia na população residente em municípios da localidade.
- Existe uma correlação direta entre as concentrações de ^{222}Rn no ar do Seridó paraibano com a proximidade de corpos hídricos e o uso de água subterrânea pela população residente nos municípios avaliados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o risco radioativo potencial por exposição ao Radônio 222 em municípios do Seridó Paraibano.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar cômodos de maior risco de exposição do radônio 222 em ambientes internos de residências nos municípios de Picuí e Nova Palmeira, a partir dos resultados radiométricos.
- Verificar a influência do consumo de água de diferentes fontes na variação das concentrações do radônio no ar.
- Avaliar os resultados radiométricos das leituras de ^{222}Rn no ar de garimpos do Seridó oriental paraibano e verificar grau de riscos aos garimpeiros.
- Analisar o risco de câncer por exposição ao ^{222}Rn na área de estudo através do cálculo da dosimetria.

2.0 -FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Radiações ionizantes e não ionizantes

As emissões de radiação existentes no globo terrestre são geradas de forma natural pelo meio ambiente ou emitidas pelas atividades antrópicas, como as usinas nucleares e os raios-X. Porém, essas radiações podem ser classificadas em ionizantes e não ionizante, sendo a quantidade de energia emitida pelas partículas, o fator que as diferem.

A radiação não ionizante possui baixa emissão de energia e está presente em várias situações do cotidiano humano (FUNDAÇÃO OSWALDO FIO CRUZ, 2019). Exemplos são as ondas rádio, micro-ondas e que não geram risco ao desenvolvimento de patologias nos seres vivos.

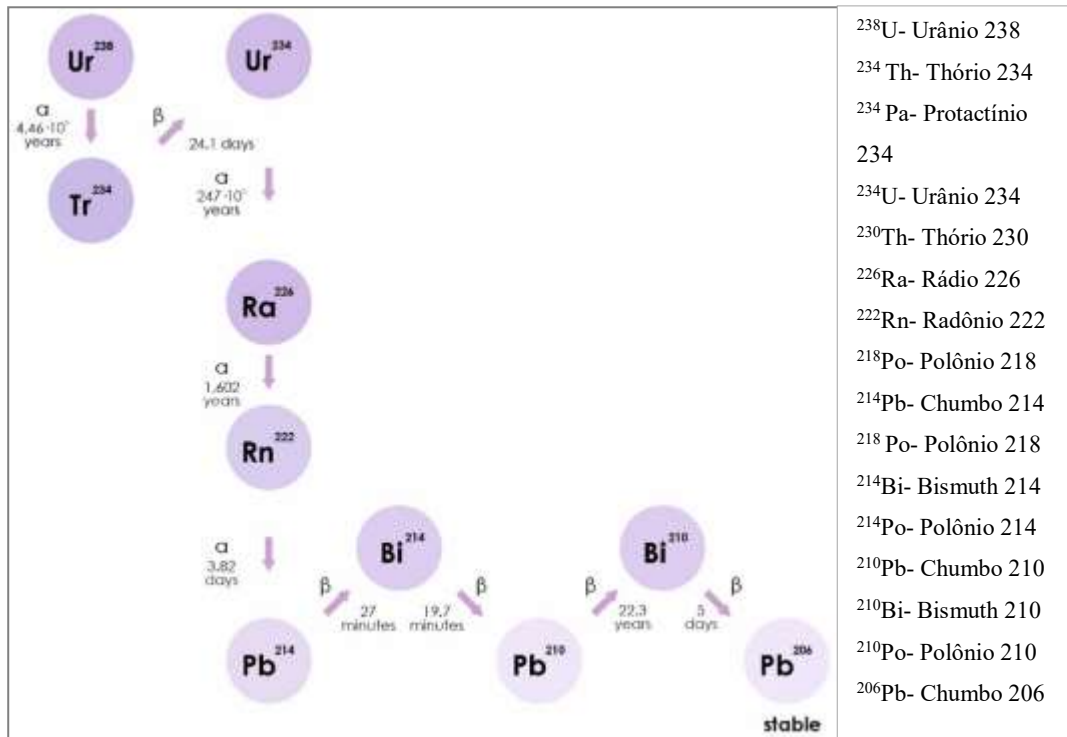
Já a radiação ionizante é originária de um núcleo atômico. Possui alto nível de emissão de energia e pode ocasionar riscos à saúde humana (ROBILOTTA, 2007). Por permitir a alteração do DNA humano, pode desencadear várias patologias, inclusive cancerígenas.

É capaz de transformar o estado físico do átomo e causar a perda de elétrons, tornando-o eletricamente carregado, processo denominado de ionização. Devido à perda de elétrons, ocorre a desestabilização de átomo, transformando-se em um íon positivo. Os isótopos dos núcleos atômicos tentam atingir a estabilidade e nesse processo é necessária a liberação de radiação (energia) pela partícula, denominada de “decaimento radioativo” (VICTORINO, 2020).

Alguns elementos químicos da tabela periódica são radioativos. O ^{238}U é um elemento radioativo que passa por um processo de transmutação. Ao iniciar a perda de energia, acontece o processo de transmutação, no qual a energia é uma forma da radiação ionizante e interage com a matéria para provocar efeitos estocásticos e determinísticos. O urânio 238 se transforma em 13 diferentes produtos, entre eles o radônio 222, até chegar a sua forma estável, que é o chumbo 206 (Figura 1).

Ao liberar radiação ionizante, os tipos de emissão podem ser caracterizados como partículas alfa (α), beta (β) ou gama (γ) as quais apresentam características bem diferentes. No caso do decaimento do urânio 238 acontece a emissão de partículas alfa e beta, dependendo da etapa que o elemento está passando (Figura 1).

Figura 1- Decaimento radioativo do Urânio 238 até a sua forma estável



Fonte: Adaptado Bersimbaev *et al.* (2020).

As partículas α , por terem massa e carga elétrica relativamente maiores, apresentam baixo alcance, porém, ao serem ingeridas ou inaladas podem ocasionar sérios danos à saúde, dado o alto poder de ionização. É uma radiação constituída por partículas subatômicas formadas por dois prótons e dois nêutrons, com carga $2+$ e com bastante energia cinética, a qual varia de 3 MeV a 7 MeV (BUSHONG, 1993).

As partículas α são emitidas por núcleos instáveis de elevada massa atômica, como por exemplo, urânio, tório e radônio. Estas partículas têm velocidades da ordem de um décimo da velocidade da luz (HALLIDAY *et al.*, 1995). A intensidade e energia da partícula são emitidas por um nuclídeo que serve para identificá-lo numa amostra, obtendo o menor poder de penetração e uma alta taxa de ionização.

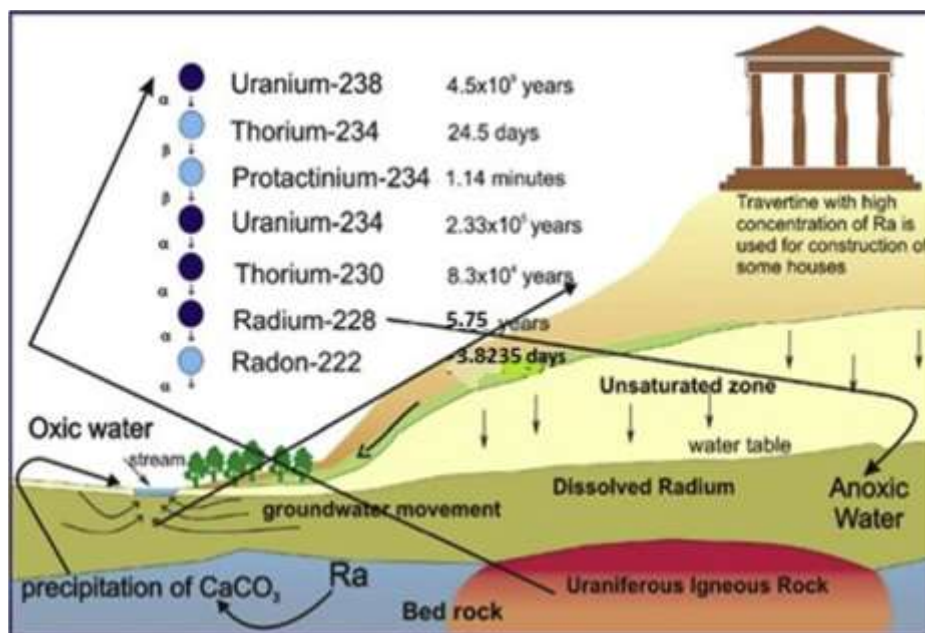
As exposições externas ao organismo humano, são inofensivas, pois não conseguem atravessar as primeiras camadas epiteliais. Porém, quando os radionuclídeos são ingeridos ou inalados, por mecanismos de contaminação natural ou acidental, a radiação α , quando em grande quantidade, pode causar danos significativos na mucosa que protege os sistemas respiratório e gastrointestinal, além das células dos tecidos adjacentes (URRGS, 2019). Nesse caso, o corpo da pessoa contaminada passa a ser uma fonte radioativa.

2.2 - Radônio 222 e fatores que influenciam a sua concentração e transporte

Devido a sua forma gasosa pode ser difundido rapidamente nos meios em que entra em contato, permitindo ser inalado através do ar e/ou ingerido no meio aquoso. Ao ser ingerido ou inalado, este elemento pode causar sérios danos à saúde humana, como câncer de pulmão (KHAN *et al.*, 2000; DUGGAL *et al.*, 2016).

A Figura 2 ilustra a cadeia de decaimento e seu tempo de meia-vida entre o Urânio 238 e o radônio 222.

Figura 2- Cadeia de decaimento do urânio 238, tempo de meia vida dos elementos e onde são encontrados



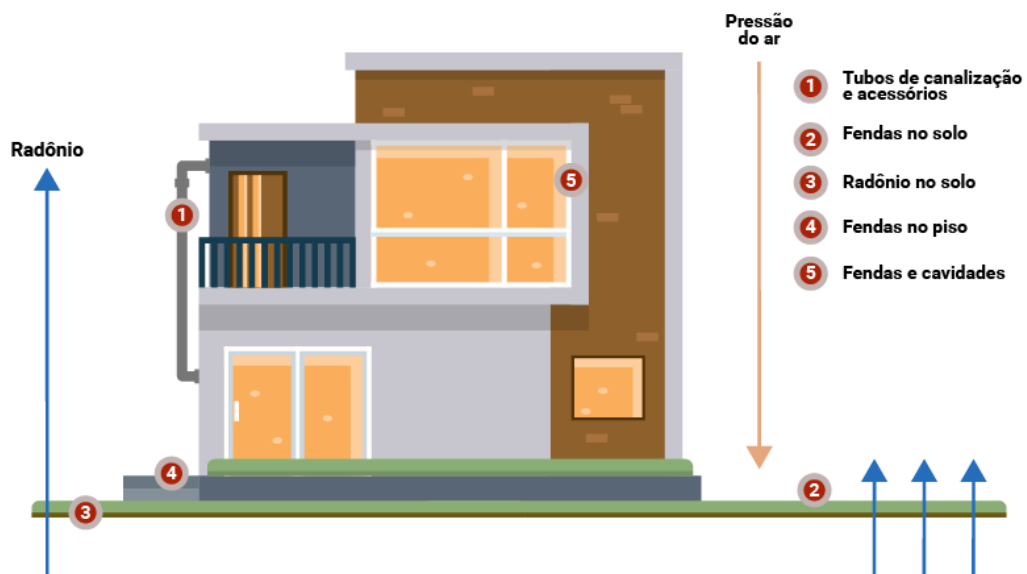
Fonte: Radioprotection in practice (2019).

De acordo com a Figura 2, alguns elementos radioativos como o ²³⁰Th e o ²³⁴Th, são produzidos no entremeio desse processo e com tempos de meia-vida mais longos, se comparados ao ²²²Rn.

O principal contribuinte para a exposição à radiação interna em edificações é o radônio (²²²Rn). Pode ocorrer em altas concentrações em áreas mal ventiladas, como minas ou mesmo em residências. Geralmente o solo é o maior fator de contribuição para o acúmulo de radônio interno. No caso de edificações construídas em pavimento térreo, há a predominância de uma maior ocorrência do gás (SZABÓ *et al.*, 2014). Exceto em casos extremos quando os materiais de construção podem ser a fonte principal de liberação do radônio 222 (SOMLAI *et al.*, 2006).

O radônio infiltra nas edificações devido às diferenças de pressão entre os lados externos e internos da base da construção (Figura 3), através das fundações e de fissuras localizadas na estrutura da edificação, como por exemplo, rachaduras, buracos e encanamentos (EPA, 2001).

Figura 3- Causas de infiltração do radônio em edificações



Fonte: Radioprotection in practice (2019).

Existem áreas em que a concentração de radiação é constante ao longo do tempo e outras as quais a concentração varia devido a intervenção de elementos externos (SOHRABI, 2013). Um dos principais fatores na distribuição do radônio ^{222}Rn no ambiente é a geologia. Segundo Fianco (2011) os altos índices de radônio estão associados a determinados tipos de rocha e depósitos não consolidados.

Nos solos, as concentrações do ^{222}Rn dependem principalmente das propriedades físicas, como por exemplo, permeabilidade, porosidade e densidade. Solos arenosos facilitam a migração de radônio para a superfície e solos argilosos dificultam essa migração e difusão do gás, devido ao seu baixo índice de vazios (FIANCO, 2011).

Os solos, em geral, liberam mais radônio que as rochas devido seus constituintes serem mais facilmente desagregados uns dos outros. Segundo Rahman *et al.*, (2007), 60% do radônio encontrado em ambientes internos são provenientes do solo da fundação e do solo ao redor da construção.

A variação da umidade do solo também é um fator que pode influenciar nas concentrações de radônio. Essa variação torna o solo susceptível ao inchaço ou a contração, abrindo e fechando caminhos através das fissuras. Em meio saturado, o fluxo do radônio é

preferencialmente lateral e é controlado pelo fluxo de água subterrânea. Em meio não saturado, prevalecem os processos de difusão gasosa, processos de difusão de vapor e capilaridade (REBELO *et al.*, 2003).

De acordo com UNSCEAR (1993), as concentrações de radônio também variam ao longo do dia. Concentrações máximas são medidas nas primeiras horas do dia e concentrações mais baixas são medidas ao fim da tarde, sendo de aproximadamente um terço dos valores da concentração máxima. Também as estações do ano afetam as concentrações de radônio. Os níveis de ^{222}Rn são maiores nos meses de outono e inverno e menores nos meses de primavera. Essa variação ocorre de acordo com os padrões de turbulências atmosférica, que tendem a ser maiores na primavera.

Da Silva (2005) considera que o fluxo de ventilação de um ambiente é um dos fatores mais importantes nas medidas de concentração de radônio. Dessa forma, embora o clima possa não influenciar direta e significativamente nas concentrações, o comportamento das pessoas, que muda de acordo com o clima, possibilitando maior e menor ventilação nos ambientes, pode ser predominante nas medidas.

Outro fator que altera a concentração de radônio no ambiente é a pressão atmosférica. Com uma menor pressão atmosférica os átomos de radônio se direcionam com mais facilidade para a superfície. Por ser um gás cerca de sete a oito vezes mais pesado que o ar, o radônio tende a concentrar-se próximo ao solo, no nível do ar respirado pelos seres humanos, facilitando, dessa forma, sua inalação (DEL CLARO, 2013).

Ainda segundo Del Claro (2013), a solubilidade do radônio depende de seu coeficiente de partição (K_T), que por sua vez, depende da temperatura. A medida que a temperatura aumenta, a solubilidade do gás ^{222}Rn diminui. Dessa forma, considera-se o ^{222}Rn relativamente insolúvel em água e com alta solubilidade em líquidos orgânicos. Decorrente da característica de pouca solubilidade em água, o transporte do gás radônio para a superfície é facilitado.

2.3- Padrões internacionais para as concentrações de ^{222}Rn no ar e na água

Os padrões estabelecidos como valores seguros para a inalação de radônio variam de acordo com a legislação de cada país e a organização mundial de saúde.

Acredita-se que essa variação esteja associada à prevalência de radônio que depende, entre outros fatores, das características geológicas de cada localidade. Alguns países como

Estados Unidos e Portugal, por exemplo, possuem uma formação geológica favorável a ocorrência do gás radônio, devido a existência de urânio no subsolo.

Nos Estados Unidos foi constatado que o ^{222}Rn é a segunda maior causa de morte por câncer de pulmão, vitimando 21.000 hab./ano, sendo superado apenas por mortes decorrentes de tabagismo (NATIONAL CANCER INSTITUTE, 2010). Quando presente na água potável, este isótopo e seus descendentes também podem gerar risco significativo de câncer de estômago e gastrointestinal, principalmente quando as águas são originárias de fontes subterrâneas (DUGGAL, 2019).

Na literatura científica mundial já existem registros de vários países que constataram níveis elevados de radônio no meio ambiente, entre eles estão Venezuela, Irã, China, Índia, Brasil, Japão e México. Porém, em todos estes, há inexistência de leis e diretrizes nacionais que tratem sobre as concentrações máximas permitidas para a água potável e o ar (KERAMATI *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2020; OSORIO *et al.*, 2020; NAKASONE *et al.*, 2021). Nestes casos, são utilizados como limites comparativos os padrões impostos por Nações desenvolvidas ou Organizações de âmbito mundial, como os Estados Unidos e a Organização das Nações Unidas (WHO, 2001; UNICEAR, 2008).

Os limites máximos propostos para ^{222}Rn em água potável e o ar, divergem largamente entre os países e organizações que obtêm legislações próprias. Os Estados Unidos estabelecem um limite de 11,1 Bq/L para presença de do isótopo na água potável. Em contraponto, na União Européia são utilizados valores de 100 a 1000 Bq/L, sendo considerados casos de intervenção apenas aqueles acima de 1.000 Bq/L (EUROPEAN COMMISSION, 2001; EPA, 2009). Para o ar, as concentrações máximas estabelecidas no meio internacional também são bastante distintas, podendo apresentar, em alguns países, valores quatro vezes maiores do que o recomendado pela WHO (2007) que é 100 Bq/m³. Portanto, observa-se que, apesar da existência de estudos sobre os níveis de radônio, estes ainda são escassos e associados às realidades locais.

Em 2003 a Organização Mundial da Saúde (WHO) publicou uma Guideline recomendando os valores máximos para as concentrações de ^{222}Rn na água potável e no ar, sendo estabelecidos respectivamente, valores de 100 Bq/L e 100 Bq/m³. O valor de 100 Bq/L recomendado pela WHO foi adotado pela Itália, França, Alemanha e República Tcheca como limite máximo permitido desse gás na água potável.

Já países como Áustria, Suécia e Reino Unido optaram por estipular uma faixa de valores que se inicia com os 100 Bq/L, indicados pela WHO, e segue até um limite máximo de

1.000 Bq/L. O intervalo de 100 a 1.000 Bq/L de ^{222}Rn na água potável, foi estabelecido pela União Europeia (UE) como diretriz para os países pertencentes a sua área de abrangência.

Alguns países da UE (Noruega, Portugal, Espanha e Irlanda) estabeleceram seus próprios limites em legislações internas, sendo mais restritivos quanto ao valor máximo permitido. Portugal e Espanha determinaram valores intermediários ao intervalo estabelecido pela EURATOM (Comunidade Europeia da Energia Atômica) permitindo um valor máximo de 500 Bq/L de ^{222}Rn em água potável.

Em 2009 a WHO lançou uma Guideline intitulado *Manual sobre o radônio interior - Uma perspectiva de saúde pública*. Este manual não faz referência aos limites estabelecidos quanto à presença do isótopo ^{222}Rn na água potável, pois indica uma maior relevância deste elemento radioativo no ar, principalmente quando tratado em ambientes internos (WHO, 2009).

A maior preocupação com a presença de radônio no ar fundamenta-se em pesquisas que comprovam a ocorrência de câncer de pulmão devido à inalação desse gás e a facilidade de calcular a dose efetiva inalatória absorvida por cada ser humano, através de medições simples do ar (USEPA, 2000; ELÍO *et al.*, 2018; MARTÍNEZ *et al.*, 2018).

Alguns outros fatores também reforçam a maior relevância da incidência desse radionuclídeo no ar. A sua alta volatilidade, pois quando presente na água parte deste elemento radioativo pode ser dissipado para o ar, através do revolvimento do líquido, que pode ocorrer durante a manipulação do meio aquoso em atividades diárias dentro das residências, contribuindo para o aumento das concentrações no ar interno de ambientes (WHO, 2009).

Também há relatos científicos que demonstram o aumento da influência de radônio em ambientes internos de convívio humano, através da contaminação de materiais de construção utilizados nos acabamentos de alvenarias, sendo mais um fator acumulativo de radiação ionizante no ar (TENE *et al.*, 2021).

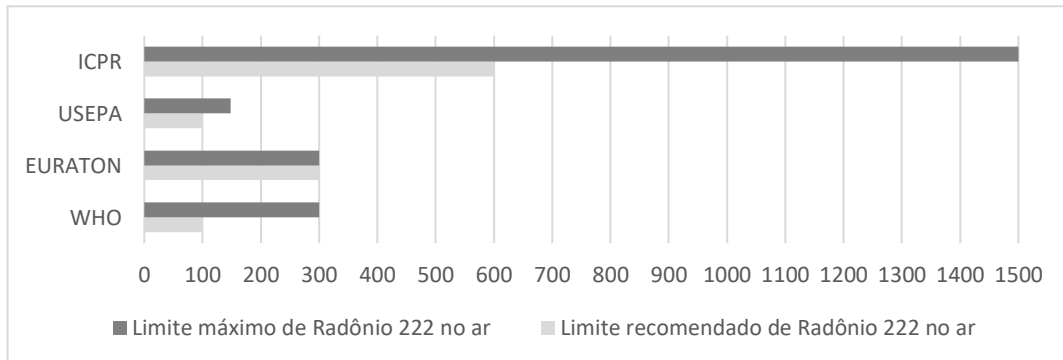
Outro argumento que reforça a ideia de maior preocupação com a concentração de radônio no ar é que, apesar da literatura científica associar câncer de estômago e gastrointestinais com a ingestão de água contendo níveis diferenciados de radônio, até o momento não há conclusões definitivas que o elemento seja uma das causas efetivas desta patologia. Diferentemente da contaminação por ingestão, a ocorrência de câncer de pulmão devido a inalação do gás ^{222}Rn , já foi constatada por meio de pesquisas científicas (LÓPEZ-HA *et al.* 2017; VIENNEAU *et al.* 2017; ABENTE *et al.*, 2018 ; GASKY *et al.*, 2018; VOGELTANZ-HOLM *et al.*, 2018; BERSIMBAEV *et al.*, 2020; CHENG *et al.*, 2021).

O maior controle da presença de radônio no ar torna-se cada vez mais evidente. Entretanto, o limite recomendado para o ar permaneceu o mesmo estabelecido na Guideline de 2003, 100 Bq/m³ (WHO, 2001). Mesmo após a recomendação de limite máximo estabelecido pela WHO, vários países com legislações sobre padrões de radônio ainda utilizam faixas de valores e não um valor fixo para a contaminação do ar.

Portugal e França, por exemplo, estabelecem faixas de valores recomendados iniciando em 100 Bq/m³ e admitindo até o máximo de 400 Bq/m³ (EURATOM, 2000).

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), que também é uma organização bastante respeitada na área de estudo, não limita valores de concentrações desse gás na água, mas recomenda para ambientes internos de permanência prolongada um limite máximo de 600 Bq/m³ no ar e em ambientes internos de trabalho um limite máximo de 1.500 Bq/m³ (ICRP 1993, WHO 2001). A Figura 4 traz os valores limites de referência para o ²²²Rn no ar indicados pelas organizações mais citadas em trabalhos científicos: ICRP, US EPA (United States Environmental Protection Agency), EURATON e WHO.

Figura 4-Limites propostos por organizações mundiais para o radônio 222 no ar



Fonte: Autoria própria (2021).

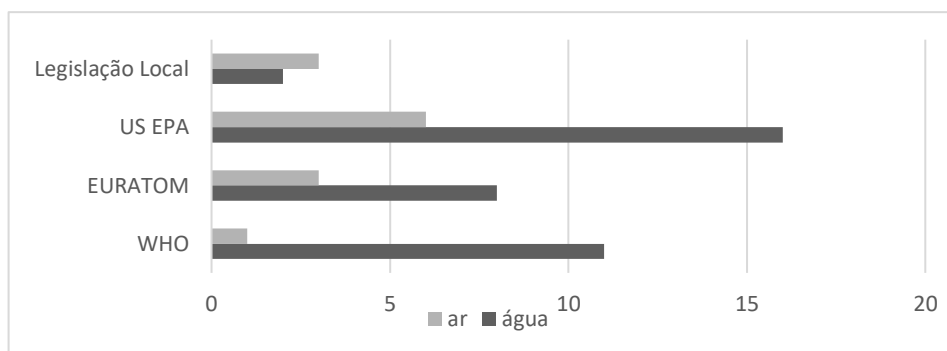
Comparando os limites máximos permitidos pelas organizações observa-se uma discrepância de 900% entre os valores da ICRP e US EPA e 400% entre o valor estabelecido pela ICRP em relação à EURATON e WHO. A US EPA estabelece um limite máximo de 150 Bq/m³, metade do valor estabelecido pela EUROCON e WHO. Essas duas últimas organizações concordam com o limite máximo de 300 Bq/m³, entretanto, discordam em 200% com relação aos valores recomendados.

Todas as divergências apontadas indicam que apesar das várias diretrizes já existentes para limitar a presença de ²²²Rn no ar, ainda existe um desconhecimento, por parte das

organizações de âmbito mundial, sobre os limites de segurança e nocividade que esse elemento possui.

Com relação às concentrações máximas e recomendadas para o radônio na água potável, apenas a USEPA e a EURATOM permanecem com valores definidos. Entretanto, assim como o comportamento observado em relação ao ar, a diferença entre os limites propostos pelas duas organizações é significativa, sendo o limite máximo indicado pela EURATOM 90 vezes maior do que o padronizado pela USEPA (Figura 5).

Figura 5- Limites propostos por organizações mundiais para o Radônio 222 para a água.



Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 1 apresenta um levantamento bibliográfico das concentrações recomendadas e máximas permitidas para radônio nas organizações já citadas e em legislações específicas de alguns países do mundo.

Quando comparadas as federações que estabelecem limites máximos e recomendados para esse isótopo no ar e na água potável, também há muitas divergências entre os limites propostos. Essas diferenças geram incertezas sobre os riscos à saúde humana decorrentes da exposição ao radônio.

Outra questão preocupante e que merece atenção, diz respeito à ausência de legislação específica em algumas localidades. Áreas reconhecidas pela literatura como mais propensas à influência do radônio e nomeadas Áreas de Radiação Natural de Alto Nível (HBNRAs), como Poços de Caldas no Brasil, Ramsar no Irã, Orissa e Kerala na Índia e Yangjiang na China, ainda não possuem legislações locais nem nacionais que padronizem as concentrações máximas aceitáveis na água potável e no ar (EPA, 2000; ESLAMI *et al.*, 2019; FATHABADIAB *et al.*, 2019). Nesses países, vigoram apenas portarias que estabelecem valores máximos de

concentração de partículas alfas presentes no ar e na água potável, sem especificar o elemento radioativo.

Tabela 1- Resumo das concentrações recomendadas e máximas de radônio 222 nas legislações de países e organizações

Organização/ Países	Concentração recomendada na água potável (Bq/L)	Concentração máxima na água potável (Bq/L)	Concentração recomendada no ar interno (Bq/m³)	Concentração máxima no ar interno (Bq/m³)
WHO	100*	100*	100	300
EURATOM	100	1000	300	300
Estados Unidos (US EPA)	11.1	-	100	148
ICRP	-	-	600	1500
Portugal	-	500	100	400
Noruega	100	500	200	200
Áustria	100	1000	300	400
Suíça	-	-	140	400
Suécia	100	1000	200	400
Reino Unido	100	1000	200	200
Finlândia	300	1000	200	400
Bélgica			200	400
Itália	100	-	200	200
Grécia	-	-	-	400
Espanha	-	500	200	-
República Tcheca	100	100	-	400
França	100	100	100	400
Alemanha	100	100	100	200
Irlanda	100	500	100	200
México	-	-	-	-
China	-	-	-	-
Brasil	-	-	-	-
Canadá	-	-	-	200

Obs: *Esses valores foram propostos pela Guidelines for Drinking-water Quality. (-) Países que não obtêm limites estipulados para Radônio 222 na água e no ar.

Fonte: Autoria própria (2022).

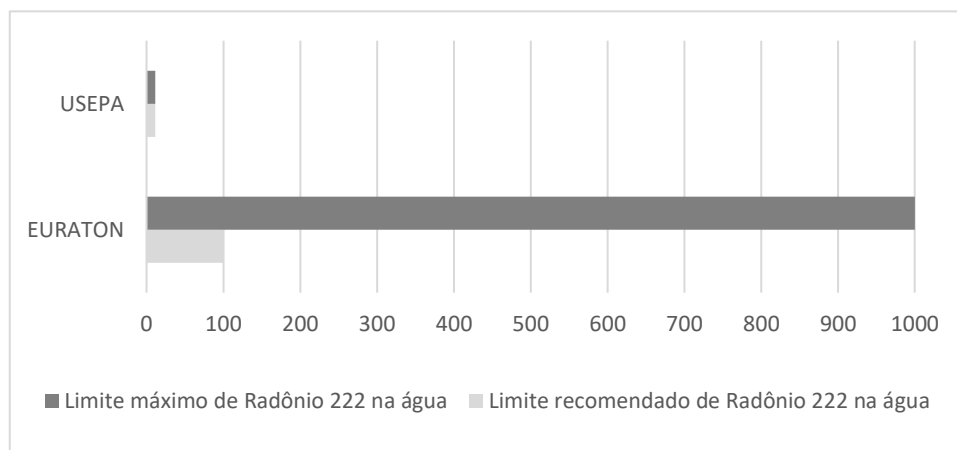
A tendência em considerar mais relevante a presença do ²²²Rn no ar identificada nas últimas publicações da WHO e ICRP, principalmente em ambientes internos e de permanência prolongada é embasada em estudos de magnitude do risco de câncer de pulmão em trabalhadores de minas subterrâneas e que são expostos ao gás. Esses estudos sugerem fortemente que esse gás radioativo pode ser uma causa de câncer de pulmão na população em geral, devido à exposição confinada em residências e demais construções (NCRP, 1984).

Adiciona-se a este fato a perspectiva que as concentrações de radônio estão sujeitas as variações sistemáticas e sazonais como padrões climáticos e comportamento dos moradores como abertura de janelas dentro das residências (WHO, 2001).

Assim, também são observados estudos que examinam a correlação entre as concentrações médias do radônio e as taxas médias de mortalidade de câncer de pulmão em diferentes áreas geográficas. Pesquisadores descobriram uma associação estatisticamente significativa entre a concentração do isótopo e câncer de pulmão, mesmo quando a análise foi restrita para indivíduos em domicílios com concentrações de radônio abaixo de 200 Bq/m³ (WHO, 2001). De acordo com Dobrzyński *et al.* (2018), o radônio é a segunda principal causa de câncer de pulmão sendo responsável por aproximadamente 21.000 mortes por câncer todos os anos nos EUA.

Outra percepção relevante é que no meio científico, alguns limites estabelecidos para o ²²²Rn na água e no ar são mais utilizados como referência do que outros, conforme mostrado na Figura 6. De acordo com a figura a regulamentação mais citada, entre os artigos avaliados neste estudo é a US EPA, organização que limita as concentrações de radônio 222 no território Norte Americano.

Figura 6- Organizações mais citadas na literatura quanto aos limites de radônio 222 na água e no ar nos artigos avaliados



Fonte: Autoria própria (2022).

Algumas das pesquisas que utilizaram como base de referência a US EPA foram desenvolvidas em países como Portugal e Polônia, pertencentes ao continente europeu que possui sua própria regulamentação. Entretanto, os autores optaram por utilizar como base valores de normas externa (CURADO *et al.*, 2017; NOVARQUES *et al.*, 2020 b). Em alguns

casos não há nenhum relato da existência de norma nacional nem o uso da mesma como elemento comparativo dos resultados obtidos na pesquisa (INÁCIO *et al.*, 2017).

Como a US EPA utiliza valores mais restritivos quanto à presença de radônio 222 no ar e na água, acredita-se que o uso mais frequente no meio científico dos valores propostos por ela é uma tentativa de obter uma maior restrição dos limites de radônio 222 em locais com regulamentações mais brandas e aumentar a segurança da população exposta ao elemento radioativo.

Com relação aos estudos científicos de radônio na água, depois da USEPA os limites estabelecidos WHO são os mais citados nos manuscritos pesquisados. O mesmo comportamento não é observado nos periódicos que tratam da presença de radônio no ar, neste caso, os valores indicados pela WHO são os menos citados.

A EURATOM obteve citações expressivas quanto aos limites de concentrações impostos para a água, principalmente em estudos de países não pertencentes ao seu bloco econômico, como a Nigéria, Índia, Canadá, México e Venezuela (BLANCO-NOVOA *et al.*, 2018; DUGGAL *et al.*, 2019; GE *et al.*, 2020; SHU'AIBUA *et al.*, 2021; ULLAH *et al.*, 2022). Porém foram obtidos números inferiores de citações em artigos voltados as concentrações de ^{222}Rn no ar, igualando-se aos descritos como legislações locais.

A ICRP não foi citada na Figura 6, pois não obteve limites impostos de radônio para o meio aquoso, conforme ilustrado na Tabela 1.

2.3 Concentrações de radônio 222 no Brasil

Em algumas localidades do Brasil as concentrações de ^{222}Rn já são avaliadas a mais de uma década, como nos estados de Minas Gerais, Santa Catarina, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte e Bahia (YOSHIMURA *et al.*, 2003; MAGALHÃES *et al.*, 2003). Inicialmente os estudos priorizavam a avaliação de locais considerados críticos, como as minas e fontes naturais de águas subterrâneas, que possuíam, de acordo com literatura, uma forte predominância de ocorrência (APPLETON, 2012). A Tabela 2 expõe as concentrações de ^{222}Rn no ar aferidas em ambientes de extração mineral subterrânea e que estão acima dos limites recomendados pela OMS (FRAENKEL *et al.*, 2008).

Tabela 2 – Concentração de radônio 222 no ar no Brasil

Locais	Concentrações (Bq/m³)
Minas Gerais	6.490 ± 256
Santa Catarina	3.026 ± 62
Rio de Janeiro	2.507 ± 75
Rio Grande do Norte	1.320 ± 41
Bahia	1.643 ± 31

Fonte: Adaptado de Fraenkel *et al.*, (2008).

Atualmente a tendência dos estudos que avaliam as concentrações de radônio no ar busca identificar a presença desse elemento radioativo no habitat dos seres humanos, seja no espaço interno das edificações ou nas áreas externas como arruamentos e praças (CASTRO *et al.*, 2005; CAMPOS *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2018; MARTIN *et al.*, 2019). Estudos elaborados neste viés de pesquisa, possuem uma maior relevância pois analisam a qualidade do ar para uma maior parcela da população, que também pode estar vulnerável.

Amaral (2016) avaliou em diferentes rochas a exalação do gás radônio, simulando para o ar interno de edificações com rochas ornamentais e identificou que ambientes que possuíam as rochas graníticas advindas de maciços de pegmatitos, denominada de Giallita obtiveram concentrações máximas de 2.576,67 Bq/m³ no ar interno.

Em outro estudo, o qual foram analisadas as concentrações de ²²²Rn no ar ao longo de um pequeno córrego em Juatuba-MG, foram obtidos resultados que variaram de 0,52 a 76,96 Bq/m³, ficando dentro do limite de 100 Bq/m³ recomendado pela OMS (FERREIRA *et al.*, 2018).

As concentrações desse radioelemento podem variar de acordo com a interferência de agentes externos, como ventilação e temperatura. Alberigi (2011) constatou que os valores de radônio são proporcionais ao aumento da temperatura, ou seja, há o crescimento ou decréscimo de ambas as variáveis concomitantemente. Nesse mesmo estudo, foram encontradas concentrações máximas de 878 Bq/m³ em cavernas localizadas no Vale do Ribeira em São Paulo.

Conforme os estudos descritos observa-se que as pesquisas realizadas no Brasil são concentradas fortemente na região sul e sudeste do país, sendo negligenciada a existência da formação geológica de pegmatitos existentes no nordeste brasileiro e os possíveis riscos associados à população (SOUSA, 2020).

2.5 Ocorrência de radônio em pegmatitos

Os pegmatitos são formados por fusões residuais derivadas da evolução e cristalização de magmas graníticos, com a concentração progressiva de elementos incompatíveis, voláteis, raros, componentes fluxantes que abaixam a temperatura de cristalização e as taxas de nucleação dos cristais (SIMMONS *et al.*, 2008).

Dessa forma, pegmatitos graníticos podem ser gerados dentro do próprio magma hospedeiro, próximo as suas bordas ou a alguns quilômetros de distância. O primeiro caso é denominado pegmatito singenético e se cristaliza ao mesmo tempo do magma granítico, o segundo caso, é chamado de epigenético e é comum quando um fluido de estágio tardio rico em voláteis é ejetado durante a fase final de acomodação do magma. Ocorrem comumente na forma de diques (Figura 7), formação ígnea intrusiva de em formato tabular, com longa extensão, podendo ter desde alguns poucos metros de comprimento, até quilômetros, mas obtendo uma pequena espessura (LONDON, 2009).

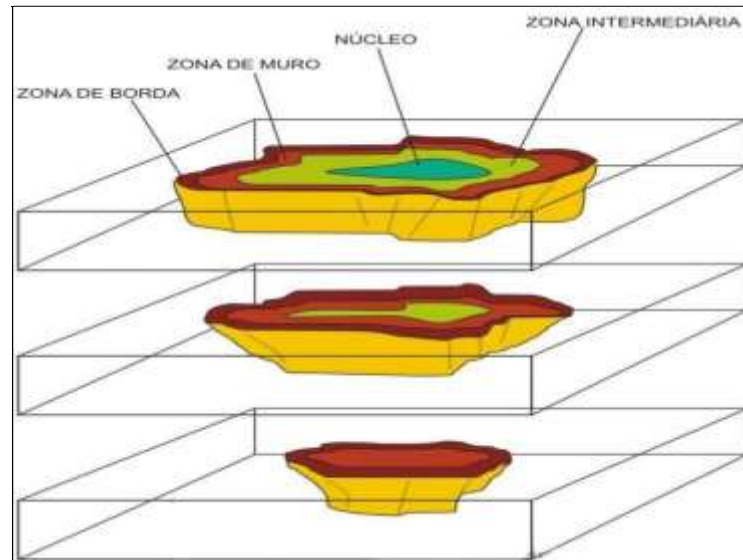
Figura 7- Perfil de rocha com a ocorrência de diques.



Fonte: Adaptado de QUEIROZ (2009).

A estrutura interna dos pegmatitos zonados pode ser subdividida em três partes principais: (1) zonas de cristalização primária (marginal/de borda, mural, intermediária – externa, média e interna) e núcleo; (2) Corpos de substituição/unidades metassomáticas; e (3) preenchimentos de fraturas, conforme ilustrado na Figura 8 (CAMERON *et al.*, 1949 apud TORRES, 2018; HEINRICH, 1953 apud TORRES, 2018; CERNÝ, 1991).

Figura 8- Bloco diagrama de um pegmatito



Fonte: Adaptado de LONDON (2008).

Em sua constituição podem obter excelentes minerais-gema e há muito são explorados como fontes primárias de feldspato, quartzo e mica industriais. Além disso, por registrarem diferentes processos ígneos, fornecem informações sobre o comportamento e concentração de metais estratégicos e raros na crosta terrestre, como Li, Sn, Ta, Nb, Be, Cs, Rb, Sc, **Th**, **U** (grifo nosso) e ETR (LONDON, 2008; LINNEN *et al.*, 2012). Entre os principais minerais encontrados nos pegmatitos estão o tório e o urânio (BIONDI, 2003).

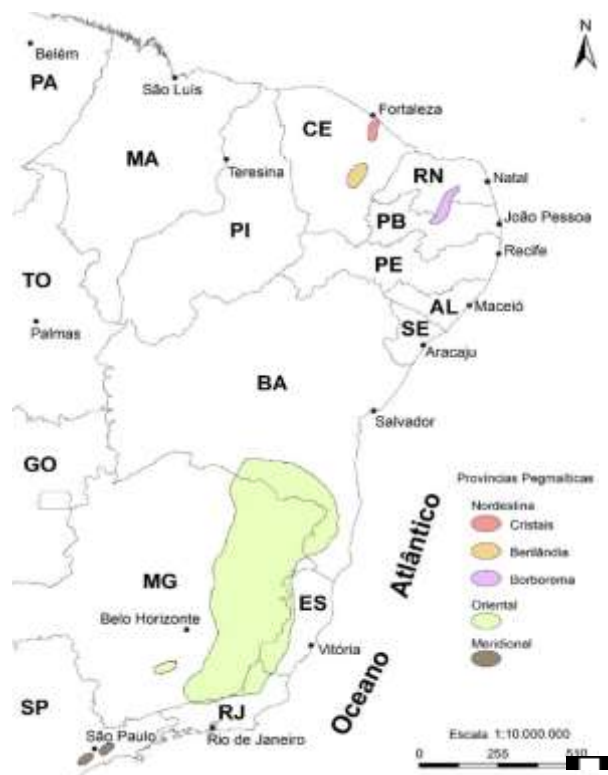
Vários estudos já avaliaram que os pegmatitos são rochas que podem conter em sua composição níveis diferenciados de urânio, e com isso, emissão do gás radônio, devido a sua formação mineralógica com a ocorrência de Tório e Urânio (AMARAL, 2011). Conforme já descrito anteriormente, o tório e o urânio são elementos radioativos que após o processo de decaimento físico se transmutam, gerando novos elementos radioativos, inclusive o gás radônio e permitem a liberação para o meio ambiente externo aos maciços rochosos.

2.5.1 Importância econômica dos pegmatitos

Os pegmatitos graníticos possuem um grande potencial econômico, devido à complexidade mineralógica presente nestes corpos, o que possibilita o aproveitamento de um grande número de minerais que vão desde o uso mais simples em cerâmica até na indústria de alta tecnologia. A importância econômica dos pegmatitos começou a ser intensamente explorada durante a Segunda Guerra mundial, onde potências como os EUA financiaram

diversos estudos em pegmatitos, para saber a viabilidade destes como fonte de elementos raros úteis na indústria bélica. Nessa época foram catalogadas várias reservas de pegmatitos, inclusive no Brasil, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Localização das três províncias pegmatíticas brasileiras.



Fonte: PAIVA (1946); PUTZER (1976); SCHOBENHAUS *et al.*, (1981).

Os pegmatitos podem ser classificados segundo suas aplicações e usos na indústria. São elementos amplamente usados na indústria automotiva, na produção de vidros, em telas de computadores, televisores, em cerâmicas e pigmentos. Como catalisadores têm diversas aplicações nas refinarias de petróleo, também são utilizados em produtos farmacêuticos e em métodos avançados de filtragem e remoção de microrganismos da água (CASTOR *et al.*, 2006).

Além disso, são importantes para a defesa das nações devido ao uso em mísseis, radares, sonares, binóculos, mira de rifles e lasers, equipamentos ópticos, incluindo lentes de câmeras, filtros e lentes protetoras, lasers e supercondutores. Estes elementos são utilizados em componentes eletrônicos e são essenciais na produção de lâmpadas fluorescentes e em lâmpadas de mercúrio (PALUDO, 2018).

Desta forma, observa-se que o pegmatito obtém uma importância de magnitude geológica, ambiental, social e econômica imprescindível para as populações habitantes não somente das proximidades dos locais de extração do minério, mas também para o país.

A ascensão dos minerais industriais não metálicos no Seridó paraibano foi consolidada na década de 1990, perdurando até os dias atuais como sendo os principais minerais extraídos na região. Na última década, os que obtiveram maior comercialização na região foram: Caulim, feldspato, quartzo, mica, argila, calcário e rochas ornamentais. Estes minerais são fortemente utilizados na indústria da construção civil, pois podem servir de matéria-prima para fabricação de materiais cerâmicos, como tijolos, telhas, pisos, revestimentos, locas, coloríficos e esmaltes, além de também contribuírem na fabricação de produtos como fertilizantes, abrasivos, isolantes, fibras-ópticas, vidros, colas adesivas, redutores, produtores químicos e farmacológicos (FERREIRA, 2011).

Em decorrência da região ser detentora de muitas riquezas naturais, mas em contrapartida ser acometida por longos períodos de estiagem, a mineração se tornou para muitos habitantes locais, que são em sua maioria agricultores, fonte de renda complementar ou principal, por não exigir muitos pré-requisitos aos trabalhadores.

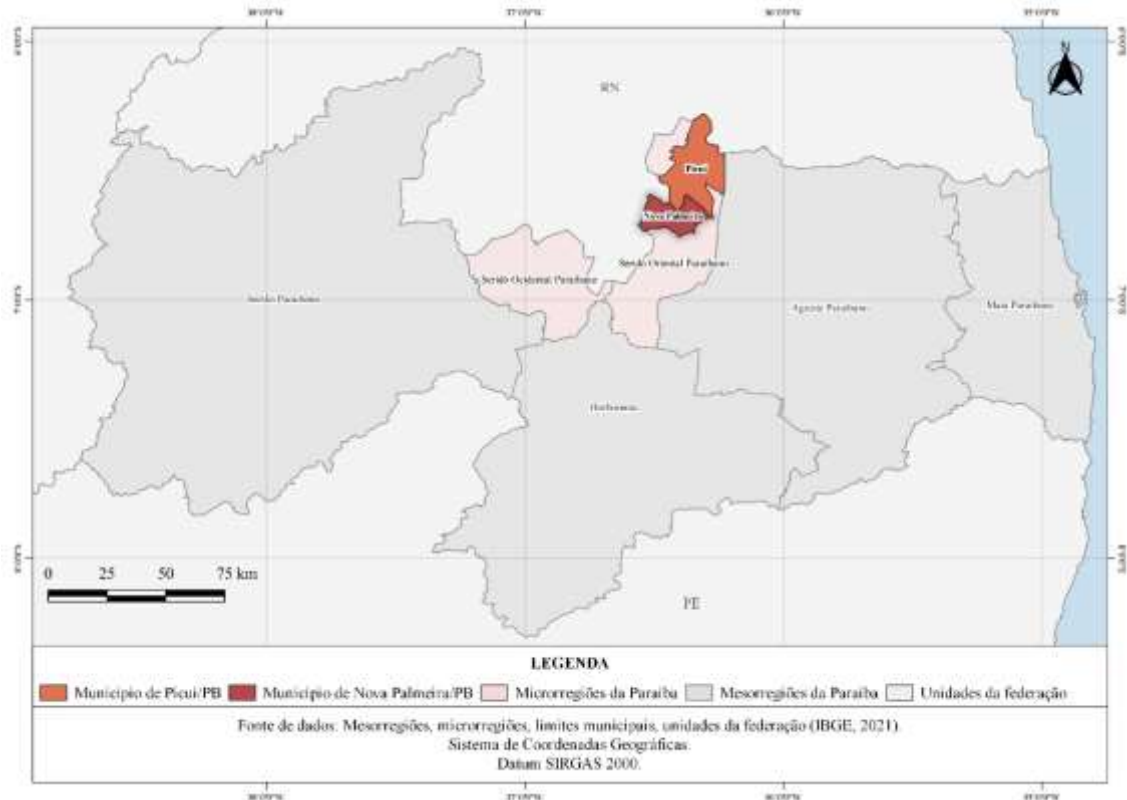
No entanto, todo minério extraído da região, ainda é na forma bruta e sem polimento, vendido em grande parte com baixo valor agregado para a indústria transformadora em âmbito nacional.

Diante desse cenário comercial estabelecido em âmbito nacional com os minérios do Seridó paraibano é importante e urgente a avaliação das concentrações de ^{222}Rn no ar, principalmente nas áreas de extração (garimpos) e proximidades. Sendo constatados valores que ultrapassem o máximo permitido deve-se avaliar o potencial dispersor de radiação dos produtos gerados nos locais onde forem aplicados.

3.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região do Seridó paraibano que é dividido em duas partes: em oriental e ocidental e faz fronteira com o Seridó potiguar (Figura 10).

Figura 10- Localização do Seridó Paraibano Oriental.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com uma população de aproximadamente 113.040 habitantes, o Seridó paraibano é distribuído em uma área total de 4.343 km² e densidade populacional média de 25 hab/km² (OLIVEIRA *et al.*, 2019). A precipitação média é de 569 mm por ano associado a uma insolação de 3.030 horas/ano, permitindo a evaporação aproximada de 2.950 mm/ano (COSTA *et al.*, 2017).

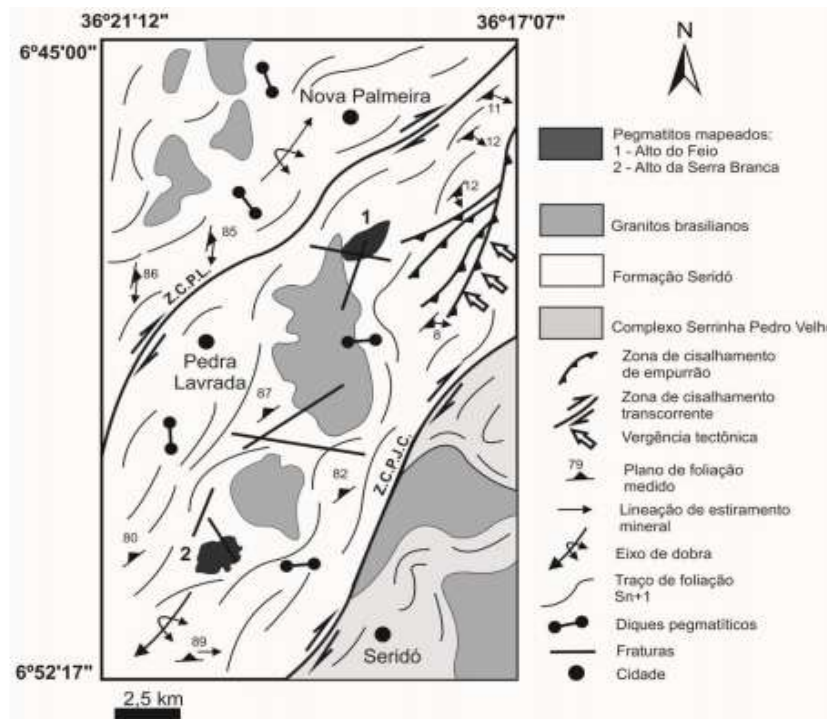
3.1 Geologia do Seridó paraibano

As características da composição da geologia neste território, que é prolongado para o território potiguar, são peculiares devido à presença de um veio de pegmatíticos.

A área a qual está localizado o Seridó nordestino concentra uma quantidade expressiva de pegmatitos e diversos corpos graníticos, cuja produção está fortemente relacionada com desenvolvimento econômico da região desde a segunda guerra mundial (FETTER *et al.*,2010). Além da produção desses minerais, há a presença de elementos geológicos portadores de metais nobres, tais como tantalita e columbita, sendo uma região privilegiada por produzir uma parcela considerável dos principais minerais industriais brasileiros (DANTAS *et al.*,2016). Alguns exemplos dessas commodities são quartzo, feldspato, mica branca, gemas de alto valor comercial, incluindo águas marinhas e a famosa turmalina Paraíba.

Geologicamente, estas mineralizações se concentram na Província Pegmatítica do Seridó (PPS), denominação empregada por Santos *et al.*,(2014) na divisa dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte e que possui a maior quantidade de pegmatitos do Nordeste do Brasil (Figura 11).

Figura 11-Contexto geológico da Província Pegmatítica do Seridó e Faixa Seridó com a localização dos principais



Fonte: BEURLEN *et al.* (2011).

Esta região é também denominada de Província Pegmatítica da Borborema (SCORZA *et al.*,1944), entretanto, foi utilizada aqui a nomenclatura de Província Pegmatítica do Seridó (PPS), uma vez que a Província estrutural da Borborema agrupa outros campos pegmatíticos importantes, tais como Solonópole, Itapiúna e Cristais localizadas no estado do Ceará.

A Faixa Seridó ocupa a porção centro-sul do Domínio Rio Grande do Norte, sendo formada por vários segmentos de rochas supracrustais que hospedam localmente importantes mineralizações, tais como tungstênio e ouro, além de outros metais (SANTOS *et al.*, 2014).

Esta unidade geológica é datada do Neoproterozoico, sendo composta da base para o topo pelas formações Jucurutu (paragnaisses, mármore, skarns e rochas calcissilicáticas), Equador (quartzitos, meta-arcóseos e metaconglomerados) e Seridó (xistos e paragnaisses compostos pela associação biotita, granada, sillimanita, cordierita, além de anfibolitos e esparsas ocorrências de mármore) (VAN *et al.*, 2003; HOLLANDA *et al.*, 2015; SANTOS *a.*, 2016).

O território do Seridó paraibano, área estudada, abrange os municípios de Baraúna, Cubati, Frei Martinho, Juazeirinho, Junco do Seridó, Nova Palmeira, Pedra Lavrada, Picuí, Salgadinho, Santa Luzia, São José do Sabugi, São Mamede, Seridó, Tenório e Várzea.

É dominado por rochas supracrustais da Formação Seridó, onde ocorrem principalmente biotita xistos e granada-biotita xistos (SANTOS *b et al.*, 2016). Em menor escala, ocorrem diversas intrusões graníticas ediacaranas, além de ocorrências subordinadas de rochas ortoderivadas (migmatitos, ortognaisses tonalíticos graníticos e anfibolitos) do Complexo Serrinha-Pedro (SANTOS *et al.*, 2000).

Ao longo desta camada de rochas supracrustais NNE-SSW, ocorrem diversas intrusões de corpos pegmatíticos com destaque para os pegmatitos Roncador, Cova dos Negros, Morro do Cuscuz, Capoeira, Serraria, Alto Serra Branca e Alto do Feio, os quais representam fontes estratégicas de intensa atividade garimpeira nos dias atuais.

3.2 Caracterização dos Recursos Minerais dos municípios avaliados no Seridó Paraibano

O processo de formação territorial do Seridó paraibano desenvolveu-se com base em quatro atividades produtivas: a pecuária, a cotonicultura (cultivo do algodão), agricultura e a mineração.

Os principais ocorrências minerais em Picuí e Nova Palmeira (Quadro 2) são os pegmatitos, podendo ser cortes em diferentes minerais como: a Tantalita, Columbita, Berilo, Caulinita, Mica, Feldspato, Albita, Albita-prego, Quartzo róseo e branco.

Em cada município avaliado há uma cooperativa (Quadro 1) que presta apoio aos mineradores na venda dos minérios e auxilia na obtenção de financiamentos para infraestrutura dos garimpos com os gestores estaduais.

Quadro 1- Cooperativas de Mineração nos municípios avaliados

Cooperativa	Municípios	Nº de cooperados	Nº de áreas formalizadas	Motivação
Cooperativa A	Picuí	75	03	Formalizar e legalizar a atividade, e controlar a produção.
Cooperativa B	Nova Palmeira	60	01	Fortalecer a potencialidade mineral do município.

Fonte: DANTAS (2017).

De acordo com cada cooperativa os principais minerais extraídos e vendidos em cada município estão descritos no Quadro 2:

Quadro 2- Minerais extraídos e vendidos pelas cooperativas do Seridó

Cooperativa	Municípios	Minerais extraídos	Beneficiamento
Cooperativa A	Picuí	Quartzo, micas, feldspatos e berilo. Tantalita e columbita.	_____
Cooperativa B	Nova Palmeira	Feldspatos, quartzo, tantalita e berilo.	Usina de beneficiamento com moinho de bola sendo instalada.

Fonte: DANTAS (2017)

No entanto, apesar da organização social das cooperativas, as condições de trabalho e alojamento ainda são insatisfatórias. A extração de minério ocorre de forma artesanal e sem uso de equipamentos de proteção individual – EPIs (Figura 12A e 12B) gerando aos garimpeiros maior vulnerabilidade ao risco de aquisição de doenças decorrentes das atividades laborais.

Figura 12- A) Extração de minérios no Município de Picuí com garimpeiros sem o uso de EPIs. B) Alojamento insalubre dos garimpeiros em Picuí-PB



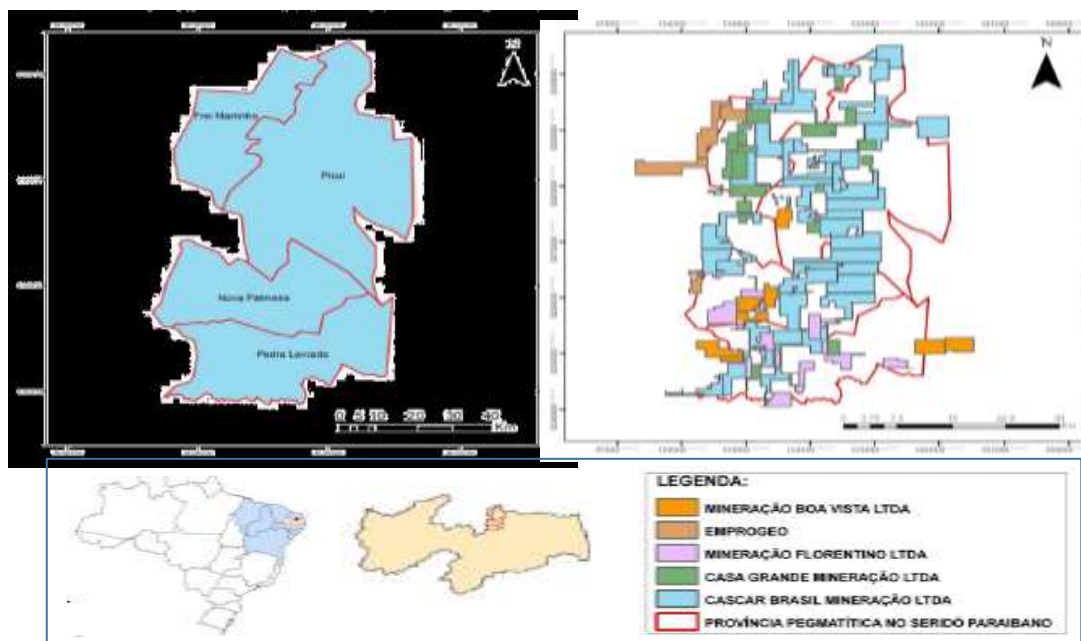
Fonte: FARIAS (2015).

Farias (2015) descreveu como ocorrem as atividades e condições de trabalho dos garimpeiros na região do Seridó paraibano:

“...Os instrumentos técnicos e as técnicas de trabalho são precárias, feitas por improviso e adaptações, onde muitas vezes são utilizados instrumentos de uso agrícola na mineração, como a enxada e a chibanca. É um trabalho intuitivo, desprovido de qualquer estudo capaz de dar uma orientação técnica adequada no processo produtivo mineral ...”

As áreas exploradas pela mineração nessa região do Seridó, estão ilustradas na Figura 13.

Figura 13- Áreas de mineração no Seridó Paraibano



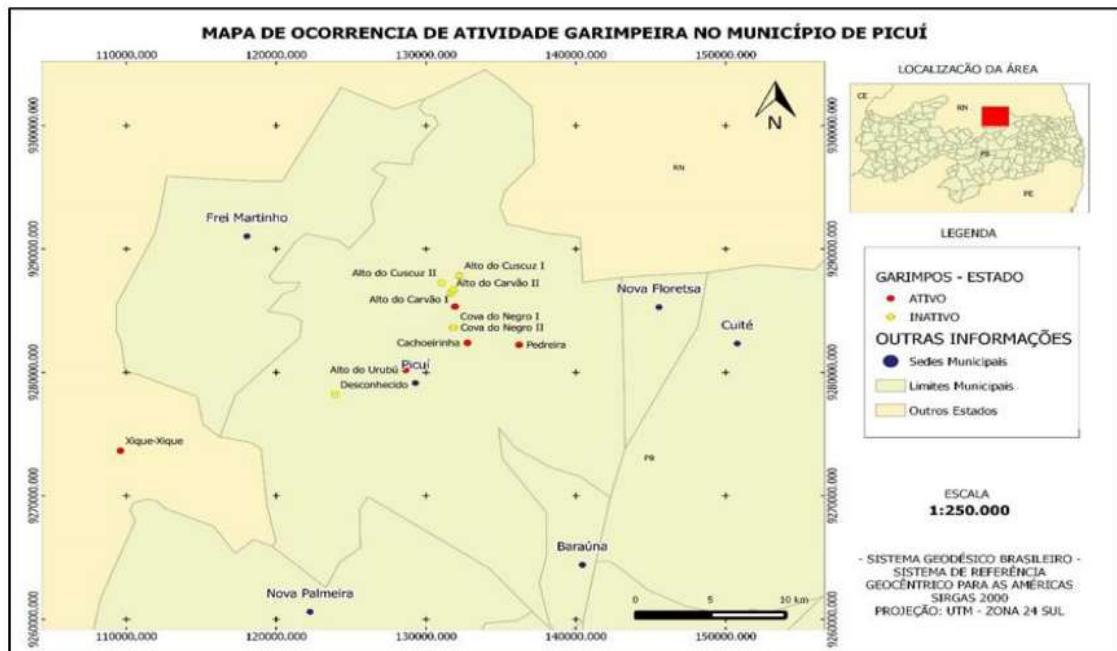
Fonte: FARIAS (2015).

Os minerais e rochas extraídos nessa região são distribuídos para todo o território brasileiro. Os minérios retirados são albita e rochas carbonáticas, que são beneficiados pela COOMIPEL. Já em Nova Palmeira o principal comprador de minérios é a cooperativa DECOPEDRAS na aquisição de tantalita.

Assim, para esta pesquisa foram escolhidos pontos para análise das concentrações de radônio no ar tanto no território de extração dos garimpos como nas proximidades com os garimpos ativos e inativos, possivelmente locais de maior vulnerabilidade.

No município de Picuí, foram identificados, mapeados e classificados em ativos e inativos todos os garimpos existentes (Figura 14). Quatro garimpos estão atualmente ativos no município, sendo o Alto do Urubu o mais próximo da zona urbana e os demais localizados na região norte do município e pertencentes à zona rural. Foram identificados seis garimpos inativos na região. Apesar da ausência de atividade exploratória podem ser fonte potencial de emissão de radônio no ar.

Figura 14 - Localização dos garimpos ativos e inativos da cidade de Picuí-PB



Fonte: ARAÚJO *et al.* (2017).

Com os dados obtidos foi iniciada a avaliação das áreas do entorno dos garimpos, identificando as residências mais próximas como possíveis pontos de maior vulnerabilidade de ocorrência de radônio no ar. Além da seleção das residências localizadas no entorno das áreas de extração de minérios, também foram locados como pontos de análises os próprios garimpos,

ativos e inativos. A análise foi realizada através do aparelho Corentium Home Radon Detector, conforme indicado no item 6.3.1.

3.3 Caracterização dos Recursos Hídricos no Seridó Paraibano

Além da identificação de locais com maior vulnerabilidade de ocorrência de radônio no ar, inseridos na “área de estu do direta”, regiões próximas também podem gerar contaminação de forma indireta. Exemplo disso é a análise da extensão das bacias hidrográficas, que podem permitir uma contaminação em vários territórios devido ao caminho percorrido pelas águas.

O Seridó paraibano está incluído na bacia hidrográfica Piranhas-Açu (Figura 15) que possui uma área de drenagem de 43.683 km² e transcende o território paraibano para o Potiguar, ao qual já foi constatada a presença de radionuclídeos primordiais.

Segundo a ANA (2013), caso haja influência dos radionuclídeos na extensão da bacia hidrográfica do Piranhas-Açu, cerca de 3.234.986 habitantes estarão possivelmente expostos a essa contaminação, incluindo a parcela que abrange o estado do Rio Grande do Norte.

Figura 15- Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu



Fonte: BRASIL (2007).

Os municípios de Picuí e Nova Palmeira também estão incluídos na bacia hidrográfica Piranhas-Açu, onde há predominância de formação geológica em aquíferos cristalinos (AESAs, 2019).

Os municípios são abastecidos pelo reservatório de Caraibeiras, que possui uma capacidade máxima de armazenamento de 2.709.260 m³ de água (AESAs, 2023). Entretanto, devido ao esvaziamento do reservatório de abastecimento ocasionado pela longa estiagem, há mais de cinco anos que a cidade não recebe água pela rede distribuidora e a população é abastecida por fontes alternativas como reservatórios subterrâneos, reaproveitamento de água de chuva armazenada em cisternas e carros pipas fornecidos em grande parte pela prefeitura municipal. Para beber, em geral, são utilizadas águas subterrâneas, advindas do município vizinho de Frei Martinho, engarrafadas e vendidas a população do Seridó.

A distribuição da água por carros pipas na zona urbana do município de Picuí-PB é feita duas vezes por semana. Os carros abastecem caixas d'água alocadas em áreas públicas, como praças e pátios de escolas afim de facilitar o acesso à população (Figura 16a). No entanto, como a demanda por água é maior do que a oferta, são observados conflitos sociais e comercialização ilegal de um bem que deveria ser de acesso universal (Figura 16b).

Figura 16- A) Caixas d'água em locais públicos para distribuição de água para a população. B) Fila de baldes para coleta de água.



Fonte: Autoria Própria (2022).

De acordo com o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas-SIAGAS pertencente à Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais- CPRM existem registrados 165 poços tubulares em uso no município de Picuí e 106 unidades em Nova Palmeira (CPRM, 2019).

Em síntese, o Seridó paraibano demonstra ser uma região com potencial para ocorrências de urânio e tório naturais, e por consequência, isótopos do radônio, tendo em vista

as suas características geológicas e a proximidade territorial com o Seridó Potiguar ao qual já foi confirmada a contaminação por radiação alfa.

3.4 Caracterização da ocorrência de câncer de estômago no Seridó paraibano

O Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde do Brasil (plataforma DATASUS) disponibiliza números sobre a ocorrência de morte por câncer de estômago, patologia que pode ser decorrente da inalação ou ingestão de radônio e seus descendentes. Os dados são fornecidos de acordo com o município escolhido e com a patologia desejada. Para obter informações confiáveis acerca do Seridó paraibano foi selecionado para este estudo um histórico de incidência de mortes por câncer de estômago com uma sequência de 20 anos ininterruptos de 1996 a 2016.

A Tabela 3 mostra os dados de incidência de mortes por câncer de estômago nos municípios do Seridó paraibano e as médias de ocorrência nacional e dos estados da Paraíba e de Alagoas.

Tabela 3- Incidência de morte por câncer de estômago em uma série histórica de 20 anos

Âmbito	Localidade	Incidência de óbitos (%) por câncer de estômago de (1996 -2016)
Nacional	Brasil	0,12
Estadual	Paraíba	0,09
Estadual	Alagoas	0,04
Municipal	Picuí	0,26
Municipal	Pedra Lavrada	0,20
Municipal	Nova Palmeira	0,14
Municipal	Frei Martinho	0,06
Municipal	Baraúnas	0,21
Municipal	Cubati	0,14
Municipal	Tenório	0,03
Municipal	Juazeirinho	0,06
Municipal	Santa Luzia	0,09
Municipal	São Mamede	0,11
Municipal	Junco do Seridó	0,12
Municipal	São José do Sabugi	0,02
Municipal	Várzea	0,04
Municipal	Salgadinho	0,03

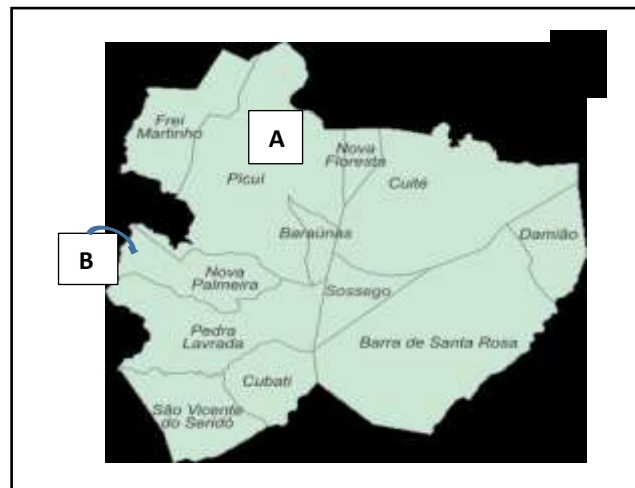
Fonte: Adaptado DATASUS (2022).

De acordo com a Tabela 3 a ocorrência de câncer de estômago no município de Picuí apresenta um número aproximadamente três vezes maior do que a média estadual e mais do que o dobro da média nacional.

Por outro lado, apesar de Nova Palmeira a incidência de morte por câncer de estômago, menor quando comparada aos municípios de Picuí e Pedra Lavrada é 53,8%, é importante a avaliação dessa região por apresentar características muito semelhante a Picuí.

Diante do benefício da logística de proximidade dos territórios (Figura 17) para execução da pesquisa, Nova Palmeira tornou-se interessante cientificamente para este estudo, pois permitirá uma avaliação da espacialização contínua dos dados de radônio no ar do Seridó Paraibano e uma possível correlação de diferentes níveis de ocorrência de mortes por câncer de estômago em área com pequenas distâncias.

Figura 17- Municípios vizinhos: Nova Palmeira, Picuí e Pedra Lavrada localizados no Seridó Paraibano



Fonte: Própria autoria (2022).

Considerando todos os fatos já expostos, foram selecionados dois municípios (Tabela 4) para a avaliação das concentrações de radônio no ar do Seridó paraibano.

Tabela 4-Cidades localizadas no Seridó paraibano com formações pegmatíticas

Cidades	Seridó paraibano	População (IBGE 2010)	Coordenadas geográficas
Picuí	Oriental	18.706 hab.	6°32'50" S; 36°21'44"W
Nova Palmeira	Oriental	4.840 hab.	6°40'44"S; 36°24'57"W

Fonte: Própria autoria (2022).

4.0 METODOLOGIA

4.1 Etapas da pesquisa

A pesquisa foi dividida em cinco etapas:

(1) Diagnóstico da área de estudo: Nesta etapa foram realizados levantamentos de informações como clima, geologia, bacia hidrográfica, fatores socioeconômicos e fatores epidemiológicos (conforme detalhado no Capítulo 3), que subsidiaram a caracterização ambiental, social e econômica do Seridó Paraibano, especialmente dos municípios de Nova Palmeira e Picuí (objetos do estudo) e que auxiliaram o desenvolvimento das demais etapas da pesquisa.

(2) Leitura das concentrações de ^{222}Rn no ar: Os dados referentes às concentrações de ^{222}Rn no ar foram obtidos por meio de medidas passivas em ambientes escolhidos de forma sistemática, com base nas possibilidades de influência de Material Radioativo de Ocorrência Natural (por sigla do inglês: NORM). Também estão incluídos nesta etapa o treinamento para uso da ferramenta de mensuração; o estudo da dinâmica do rodízio do aparelho medidor e da sequência das leituras; a logística para obtenção e envio dos dados coletados.

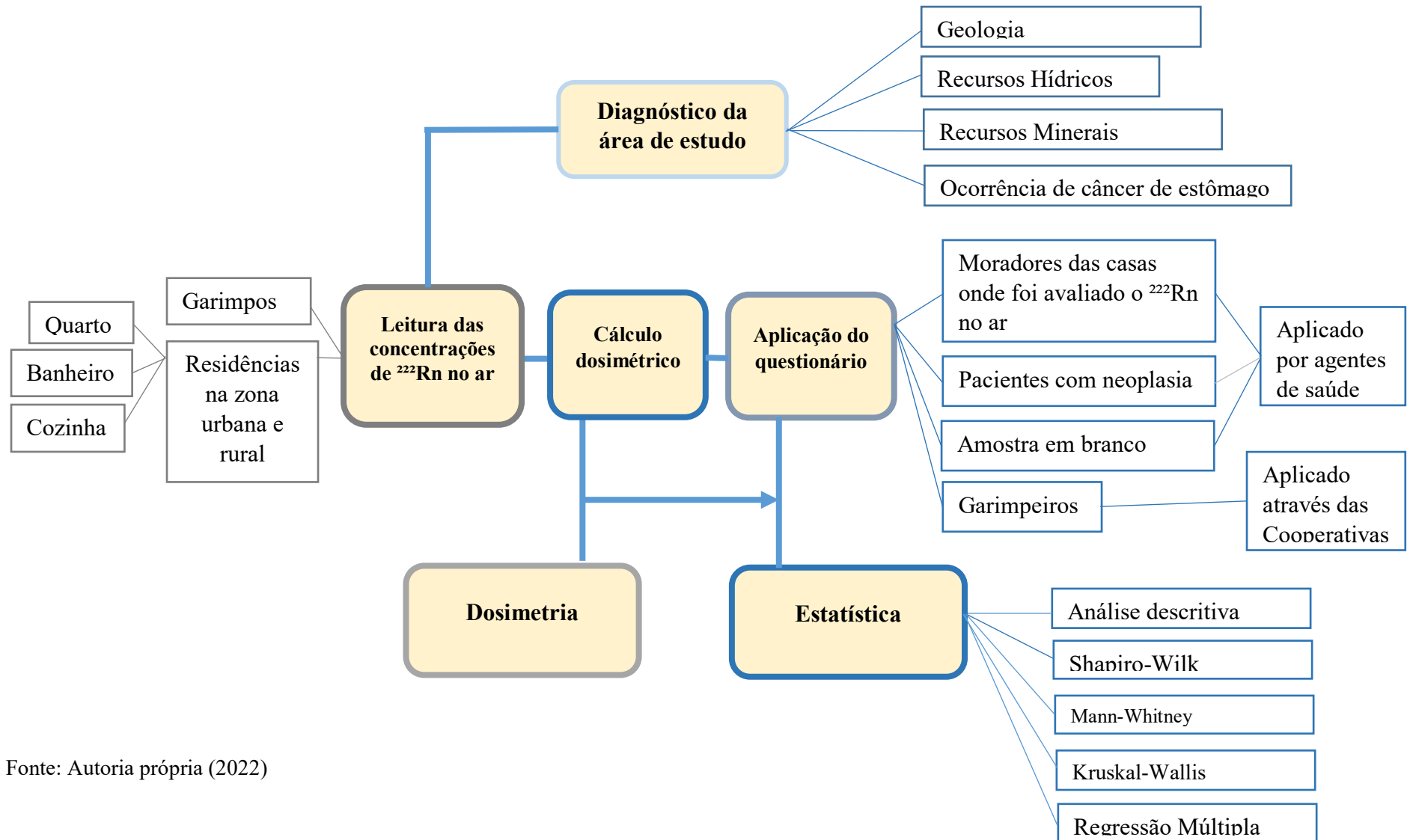
(3) Aplicação do questionário: Foram analisados quatro grupos de pessoas, os garimpeiros, pacientes com neoplasia, habitantes das casas analisadas nesta pesquisa e a amostra em branco.

(4) Análise estatística: Após triagem e processamento dos resultados obtidos foi realizado um estudo estatístico e avaliadas as correlações e interferências existentes entre as variáveis estudadas.

(5) Cálculo dosimétrico: Necessário para identificar o risco gerado pela radiação aos seres humanos, residentes da área de estudo.

A Figura 18 apresenta um fluxograma com todas as etapas desenvolvidas para alcançar os objetivos propostos na pesquisa.

Figura 18- Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Classificação da pesquisa

As etapas metodológicas classificaram a pesquisa como descritiva, exploratória, bibliográfica e de campo. Para Andrade (1993), em uma pesquisa descritiva “os fatos são observados, registrados, analisados, classificados e interpretados, sem que o pesquisador interfira neles”.

O estudo exploratório terá como função fornecer uma base de conhecimentos em torno do problema de pesquisa para assim desenvolver, esclarecer e modificar os conceitos e ideias diante da formulação de um problema estudado (GIL, 1996). Quanto à pesquisa de campo, as informações foram coletadas *in situ*, realizando a mensuração das concentrações de radônio e com a aplicação de questionários.

A pesquisa também é bibliográfica porque foram consultadas fontes secundárias como teses, dissertações, artigos, livros, Leis, sites, revistas e jornais que serviram de apoio para a construção da revisão de literatura.

Em relação aos fins, o estudo foi caracterizado como qualitativo e quantitativo. Qualitativo uma vez que utiliza a análise documental e a análise de conteúdo, tendo em vista que o pesquisador deve ter acesso à parte dos dados na forma documental para fazer inferências sobre os dados buscando identificar características relevantes entre esses resultados (GRAY, 2012). A abordagem quantitativa ocorre durante o processo de aplicação do método e as análises das concentrações de radônio.

4.2.1 Sistema de medidas e monitoração do radônio

O instrumento utilizado para medir e monitorar as concentrações ^{222}Rn se baseia em método passivo de investigação. O equipamento foi um detector de radônio, modelo: Corentium Home (Figura 19), desenvolvido pela European Organization for Nuclear Research (CERN). É um dispositivo portátil com dimensões de 119 x 69 x 26 mm, sendo facilmente transportado devido ao seu baixo peso (148 g quando acopladas as três unidades de pilhas AAA).

Figura 19- Corentium Home Radon Detector



Fonte: CERN (2019).

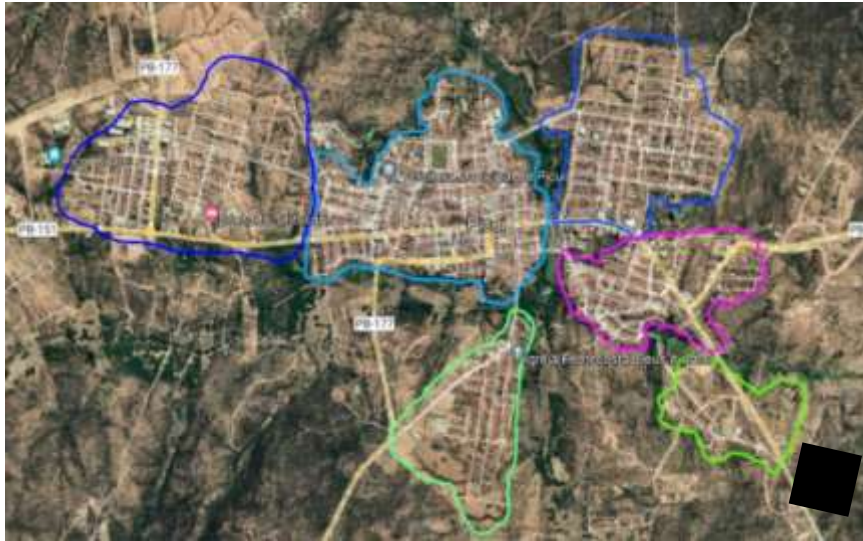
Utiliza como método de detecção a espectrometria alfa, com faixa de detecção de 0 a 9999 Bq/m³. A leitura não sofre alterações decorrente de outros tipos de radiação no ambiente, podendo suportar variações de temperaturas de 4 a 40° C, além de possuir uma acurácia de $\sigma < 20\%$ para resultados até 100 Bq/m³.

O processo de leitura foi iniciado ao ligar o aparelho que faz automaticamente à calibração, sendo necessário aguardar aproximadamente um minuto para a finalização do processo. Em seguida, o equipamento começou a etapa de aferições das concentrações de radônio no ar. Para obter o resultado da análise referente a um ambiente foi necessário um período mínimo de 24h após o início da leitura. O aparelho deveria permanecer imóvel, em uma superfície seca e sem riscos de abalos ou queda até que a leitura fosse concluída. A altura média de leitura indicada foi de 0,90m < h < 1,50 m, simulando um intervalo de cotas de inalação do ar de um adulto ou criança em pé.

Devido ao longo período para realização de cada medição foi necessário criar uma parceria com as prefeituras municipais visando integrar os agentes de saúde na pesquisa. Assim, nessa pesquisa toda parte de deslocamento do aparelho e coleta de dados *in loco* foi realizada por esses profissionais. Em cada município foram avaliadas as concentrações desse gás no ar das zonas urbana e rural, considerando a parcela amostral de acordo com o número de residências de cada área avaliada.

O município de Picuí que possui uma malha urbana extensa, foi subdividido em zonas urbanas menores (Figura 20), para um maior controle dos resultados obtidos. Já em Nova Palmeira (Figura 21) que possui menor malha urbana foi considerado um bloco único de aglomerado urbano para a espacialização dos resultados obtidos.

Figura 20 - Divisão de zonas na cidade de Picuí para análise do radônio 222 no ar



Fonte: Adaptada Google Earth (2021).

Figura 21- Zona única na cidade de Nova Palmeira para análise do radônio 222 no ar.



Fonte: Adaptada Google Earth (2021).

Nos primeiros contatos realizados com as prefeituras foi explanado para os gestores municipais, através de reuniões, a relevância da pesquisa e de como ocorreria a execução da coleta de dados (Figura 22A). Após a aprovação dos gestores, foi iniciada a etapa de treinamento dos agentes de saúde, no qual ocorreu através de palestras, juntamente com o treinamento prático utilizando o aparelho Corentium Home Radon Detector (Figura 22B).

Figura 22- Reunião com os gestores municipais do município de A) Nova Palmeira-PB e B) Picuí-PB



Fonte: Autoria própria (2022).

As reuniões abordaram uma explicação geral sobre o radônio, discutindo sobre as suas consequências para a saúde humana, o detalhamento metodológico de como deveria ocorrer às leituras das concentrações de ^{222}Rn e qual o roteiro a ser seguido em cada município. Em todas as áreas avaliadas, as orientações para o uso dos aparelhos foram as indicadas conforme detalhado no Quadro 3.

Quadro 3 - Orientações prévias dadas aos moradores para uso do aparelho Corentium Home Radon Detector.

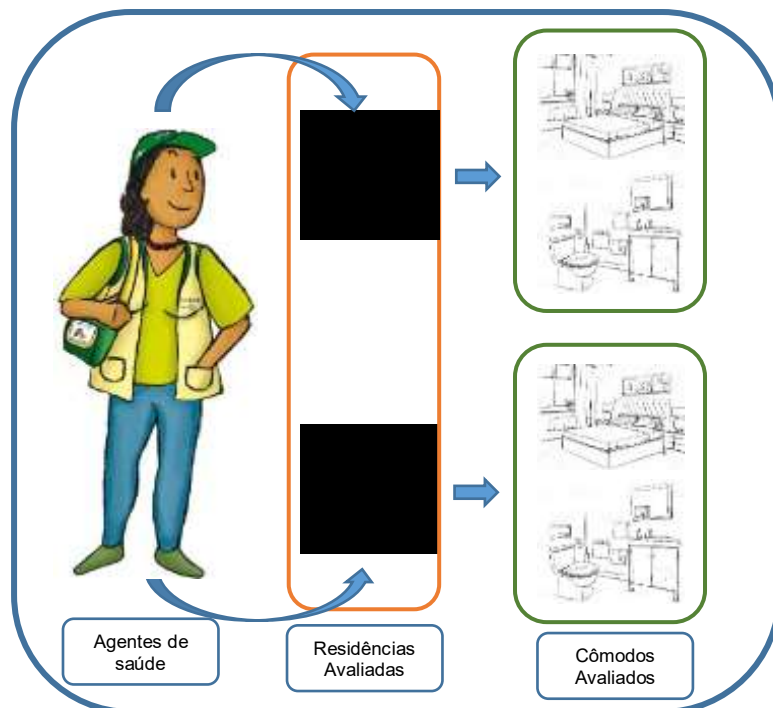
Orientações para uso do aparelho medidor	
(1)	Os agentes da zona urbana devem realizar as leituras de ^{222}Rn em duas residências, sendo a localização destas indicadas pela equipe da UFCG;
(2)	Os agentes da zona rural, além das análises nas duas residências indicadas pela equipe da UFCG, devem realizar a análise de ^{222}Rn nos garimpos, caso existam, pertencentes a sua localidade de trabalho;
(3)	Em cada residência, devem ser avaliadas as concentrações de ^{222}Rn em dois cômodos;
(4)	Para começar a análise, o agente deve ligar o aparelho, conforme sequência descrita anteriormente, posicioná-lo em uma superfície plana e registrar o horário de início e término da coleta de dados;
(5)	Informar dados relevantes sobre o ambiente avaliado, como número de portas e janelas, material presente na composição das alvenarias, fontes de água utilizadas na residência e endereço completo do local;
(6)	Repassar os dados coletados para os pesquisadores da UFCG através de um grupo privado em um aplicativo de rede social;
(7)	Instalar o equipamento no próximo ambiente ou residência a ser avaliada ou repassar o equipamento para o próximo agente de saúde que irá realizar as análises seguintes.

Fonte: Autoria Própria (2022).

Com relação aos cômodos das residências avaliadas, foram selecionados, preferencialmente, banheiro e quarto (Figura 23). O ambiente do banheiro, em geral, possui uma área pequena e poucas esquadrias, diminuindo as trocas gasosas e facilitando, caso haja, o acúmulo do gás ^{222}Rn . Além desse fato, é uma área molhada que permite a evaporação de gases presentes na água favorecendo o somatório total de concentrações de ^{222}Rn no ar.

O quarto foi escolhido por ser um cômodo de permanência prolongada em que as pessoas podem permanecer por horas respirando no ambiente, principalmente durante o descanso noturno e, em alguns casos, esse cômodo está integrado a um banheiro permitindo a passagem do mesmo fluxo contínuo de ar.

Figura 23- Esquema do rodízio nos locais avaliados por agentes de saúde e endemias.



Fonte: Própria autoria (2022).

Após as leituras, os resultados eram obtidos na unidade de medida pCi/L (Picocuries/litro), porém, para obter valores que possam ser avaliados em um padrão mundial, foi utilizada a unidade de medida global de radioatividade, Bq/m³ (Becquerel/metro cúbico). Sendo a relação entre as duas unidades expressa pela Equação 1:

$$1 \text{ pCi} = 37 \text{ Bq/m}^3 \quad \text{Equação (1)}$$

4.3 Cálculo amostral e espacialização dos pontos para avaliação da concentração de ^{222}Rn no ar

Na elaboração do cálculo amostral das populações avaliadas, os dados de entradas foram definidos de acordo com as características de cada grupo selecionado. Para as concentrações de radônio nas residências foi considerado o número total das residências urbanas e rurais de cada município e calculada a amostra. Após a obtenção do valor amostral, os pontos de análises foram distribuídos de forma espacial e o mais uniforme possível na zona rural, onde havia habitação, e em cada zona identificada na malha urbana (Figuras 20 e 21).

4.3.1 Espacialização das residências avaliadas nas zonas urbana e rural

Um critério importante para espacialização dos pontos de coleta nessa pesquisa foi a influência da água nas concentrações de ^{222}Rn no ar. Para tentar identificar a influência da água superficial no ^{222}Rn gasoso, buscou-se selecionar dentro do número amostral de casas da zona urbana e rural, algumas que fossem próximas de corpos hídricos superficiais. Foram escolhidos dois reservatórios no município de Picuí que possuíam cenários diferentes, sendo um de pequeno porte na área urbana com o entorno densamente povoado, denominado de Açude Jandovi, e o outro localizado na zona rural, com baixa densidade demográfica em seu perímetro, intitulado de açude Várzea Grande.

No município de Nova Palmeira não foi possível realizar essa espacialização dos pontos de coleta, pois os açudes identificados não possuíam residências próximas as suas margens, não sendo possível realizar a distribuição. Na Figura 24 é possível visualizar os açudes A e B que distam 1600 m entre eles, e apesar da extensa faixa territorial não havia nenhuma edificação próxima.

Figura 24- Açudes com perímetro não habitado no município de Nova Palmeira-PB.



Fonte: Google Earth adaptado (2023).

O Açude Jandovi que foi selecionado na zona urbana de Picuí, fica situado no bairro JK com aproximadamente 325 domicílios no seu entorno. Considerando uma média de 4 pessoas por domicílio, estima-se que a população total do bairro é de 1300 habitantes, contendo, dessa forma, 6,95 % da população total do município (Figura 25).

Figura 25- Açude Jandovi localizado em Picuí-PB



Fonte: Grismino (2020).

Logo, para melhor analisar os resultados foram distribuídos treze pontos de coleta, detalhados na Figura 26 deixando raios de distância diferentes com relação a proximidade com o açude Jandovi.

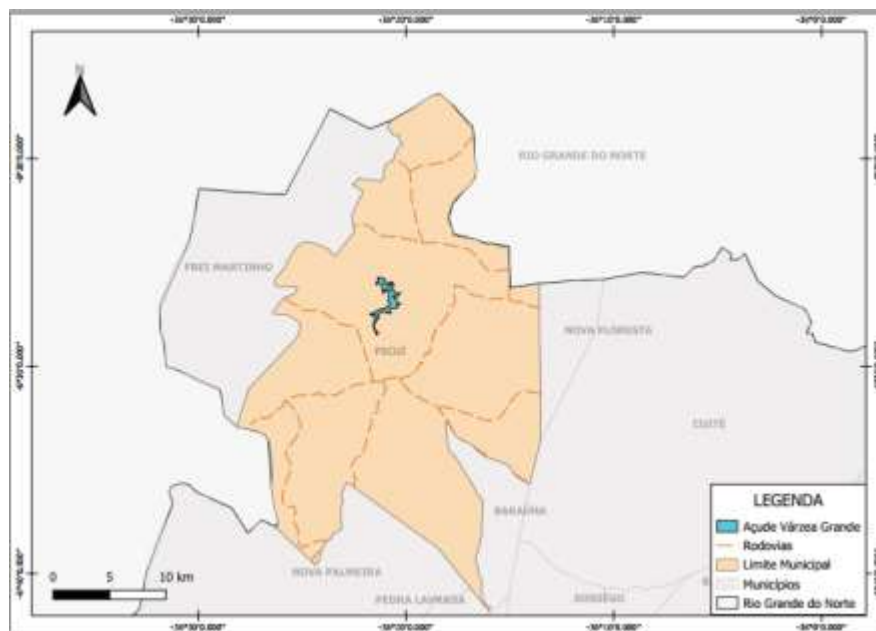
Figura 26- Casas avaliadas próximas do Açude Jandovi



Fonte: Grismino (2020).

O segundo reservatório avaliado é o açude de Várzea Grande (Figura 27). Maior em capacidade de acumulação hídrica no setor Leste da sub-bacia do rio Seridó, esse açude, com capacidade máxima corresponde a 21.532.659 m³, dista aproximadamente 7,5 km da zona urbana de Picuí-PB.

Figura 27- Localização do Açude Várzea grande em Picuí-PB.



Fonte: Guedes (2021).

Até o ano de 2016, o açude abastecia os municípios de Picuí, Nova Palmeira e Frei Martinho sendo em sequência desativado do sistema de hídrico (AESAs, 2023). O uso de suas águas também era destinado a pesca e demais atividades como banho recreativo, lavagens de veículos e caça. No entorno do açude, encontravam-se casas espaçadas, residências unifamiliares e armazéns para apoio do funcionamento de atividades agropecuárias.

Na escolha das residências levou-se em consideração o mesmo critério do Açude Jandovi, distâncias com raios diferenciados de cada residência ao corpo hídrico, possibilitando uma amostra mais estratificada. Essa área de estudo foi separada em quatro regiões, totalizando 14 residências. A disposição das regiões é apresentada na Figura 28, enquanto a Tabela 5, apresenta o número de residências escolhidas para cada região.

Figura 28- Disposição das regiões no entorno do açude Várzea Grande.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 5: Número de residências para cada região

Região	Casas
1	5
2	4
3	2
4	3
Total	14

Fonte: Autoria própria (2022)

Para o cálculo amostral das residências na zona urbana e rural das concentrações de ²²²Rn no ar a quantidade de residências avaliadas no entorno dos corpos hídricos superficiais

Jandovi e Várzea grande estão incluídos no número amostral total apresentado na Tabela 7. Para as demais residências avaliadas foram distribuídas de forma uniforme nas zonas urbanas e rural, visando abranger o máximo do território dos municípios.

4.3.2 *Espacialização dos pontos de coleta nos garimpos*

Já para o grupo dos garimpeiros, foram avaliadas as concentrações de ²²²Rn no ar em todos os garimpos relatados pela gestão municipal. Os gestores informaram que havia uma grande informalidade nos serviços extrativista minerais e os pontos de extração eram bastante concentrados, sendo possível avaliar em todos os elencados conforme o Quadro 4.

Quadro 4. Garimpos que foram avaliados ²²²Rn no ar.

Garimpos	
Picuí	Nova Palmeira
Morro do cuscuz	Quixaba do Melo
Alto das Panelas	Saco do Cipó
Chico Amaro	-
Alto da quixabeira	-
Alto do carvão	-
Tanquinhos	-

Fonte: Própria autoria (2022).

4.3.3 *Detalhamento do cálculo amostral*

Todos os resultados do campo amostral contido na Tabela 7 consideraram um nível de confiança de 90% e foram calculados de acordo com a Equação 2 (WEYNE, 2004) e os valores da Tabela 6.

$$Amostra = \frac{\frac{z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2 \cdot N}\right)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

N = tamanho da população;

e = margem de erro (porcentagem no formato decimal);

z = escore z;

p= valor percentual (valor decimal).

O escore z é o número de desvio padrão entre determinada proporção e a média. Para encontrar o escore z correto a ser usado, a Tabela 6 deve ser consultada.

Tabela 6-Parâmetros utilizados para o cálculo das amostras.

Grau de confiança desejado	Escore z
80%	1,28
85%	1,44
90%	1,65
95%	1,96
99%	2,58

Fonte:WEYNE (2004).

O número amostral das residências avaliadas nas zonas urbana e rural dos municípios da área de estudo estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Descrição das amostras que foram avaliadas na pesquisa.

Municípios	Locais que foram avaliados	Nº Total de Residência	Nº locais que foram analisados
Picuí	Zona Urbana	5334	67
	Zona Rural	740	62
	Garimpos	10	10
Nova Palmeira	Zona Urbana	1028	64
	Zona Rural	426	59
	Garimpos	-	-

Nota: Os espaços preenchidos com (-) indica ausência de dados.

Fonte: Própria autoria (2022).

Após as aferições do ^{222}Rn no ar foi realizado o cálculo dosimétrico para determinar qual o nível de risco de exposição para população com as concentrações de ^{222}Rn encontrada. A dose efetiva anual de exposição ao gás radônio interno para a residência foi calculada usando a Equação 3 proposta pela UNSCEAR (2000).

$$AED = CRn \times Of \times Df \times If \times Ty \quad (4) \quad \text{Equação (3)}$$

Onde: AED = dose efetiva anual

CRn = média aritmética do radônio interno concentração nas residências que foi de 17,8 Bq/m³;

Of = fator de ocupação interna de 0,8;

Df = fator de conversão de dose de 9×10^{-6} mSv/Bq.h.m³;

I_f = interno fator de ocupação assumindo que o fator de equilíbrio de radônio interno é 0,4 do risco da inalação de ^{222}Rn para câncer de pulmão;

T_y = número de horas no ano como 8760 h/ano.

Entretanto, para descobrir o risco do câncer de pulmão para a população, foi necessário calcular a dose efetiva anual resultante para os pulmões (AEDL) da exposição a ambientes internos com gás radônio para os habitantes do Seridó Oriental paraibano, através da Equação (4).

$$AEDL = AED \times WR \times WT \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: AED = dose efetiva anual para exposição ao gás radônio em ambientes internos em residências do Seridó oriental paraibano (mSv/ano);

WR = fator de ponderação de radiação de um valor de 20 para partículas alfa;

WT = fator de ponderação de 0,12 para tecido pulmão.

O excesso de risco de câncer ao longo da vida ($ELCR$) ligado as doses efetivas anuais resultantes para cada residência foram calculadas usando a Equação (5).

$$ELCR = AED \times DLG \times FR \quad \text{Equação (5)}$$

Onde: AED = dose efetiva anual para exposição ao gás radônio indoor até a residência do Seridó paraibano oriental (mSv/ano);

DLG = duração média de vida estimada em 76,8 anos para a população do Brasil;

FR = risco fatal de câncer por Sievert de valor $5,5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$.

Por fim, para definir a quantidade de casos que podem ser gerados pelo ^{222}Rn no ar a cada ano, foi utilizada a Equação 6.

$$LCC = AED \times 18 \times 10^{-6} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

AED = dose efetiva anual para exposição ao gás radônio em ambientes fechados em residências do Seridó Oriental paraibano.

LCC= Casos de câncer de pulmão

Logo após ao cálculo dosimétrico, foi realizada uma investigação por meio de questionário (Apêndice A) para identificar possíveis fatores externos de influência nas concentrações de ^{222}Rn , como os materiais de construção e as fontes de água das residências avaliadas. Também foi investigado o histórico genético de doenças neoplásicas dos entrevistados e a pré-existência de patologias, como gastrite.

4.4 Elaboração e aplicação de questionário

O questionário semi-estruturado (Apêndice A) foi elaborado contendo 20 perguntas sendo dividido em dois blocos, o primeiro de dados gerais dos participantes e o segundo de características da sua residência e informações sobre histórico de saúde. O questionário foi avaliado e aprovado pelo comitê de ética da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. A aplicação do questionário foi realizada em quatro grupos distintos, conforme indicado no Quadro 5, por equipes de agentes de saúde pertencentes a cada município avaliado.

Quadro 5- Grupos aos quais foram aplicados os questionários

Grupos	Descrição dos grupos
Moradores das casas onde foram avaliados o ^{222}Rn no ar.	Aplicação com os habitantes das casas na qual o aparelho foi colocado nos cômodos.
Garimpeiros	Todos relatados pela gestão municipal que estavam em atividade laboral
Pacientes com neoplasia	Todos relatados pela gestão municipal que estavam com a patologia
Amostra em branco	Habitantes de residência que não participaram das leituras das concentrações de ^{222}Rn no ar.

Fonte: Autoria própria (2022).

No primeiro bloco do questionário o entrevistado respondeu sobre dados gerais como nº de identificação, município pertencente, endereço, idade e sexo. O segundo bloco buscou identificar características físicas sobre a residência, fonte da água consumida, hábitos pessoais como o fumo, histórico de saúde familiar e por fim, perguntas exclusivas para o grupo de garimpeiros sobre as condições de saúde e trabalho. Também nessas últimas perguntas, foi dada ênfase a identificação do uso dos EPIs durante a jornada de trabalho, fator que poderia influenciar em uma maior inalação do radônio 222 no ar durante as atividades laborais.

O questionário foi disponibilizado de forma on-line e física sendo aplicado para os

grupos de moradores das casas onde foi avaliado o ^{222}Rn no ar, pacientes com neoplasia e amostra em branco, pelos agentes de saúde dos municípios correspondentes. Os grupos de garimpeiros foram entrevistados através dos presidentes das cooperativas de mineradores, tendo em vista que a oficialização de empresas de extração mineral na região é escassa. As cooperativas que auxiliaram na aplicação dos questionários estão apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Cooperativas dos municípios do Seridó Oriental Paraibano.

Cooperativa	Município	Ano de formação	Presidente
Cooperativa dos mineradores de Picuí - COOPICUÍ	Picuí	2011	Antônio Henriques
Cooperativa de garimpeiros de Nova Palmeira - COOGARIMPO	Nova Palmeira	2007	Ruthinea Dilemma

Fonte: Adaptado de Guedes (2021).

Após a aplicação dos questionários físicos todos os dados eram direcionados ao questionário on-line e ficavam armazenados na plataforma do Google forms. Em sequência foram submetidos a etapa da estatística.

4.5 Análise estatística dos resultados

Para os dados obtidos de concentração de ^{222}Rn foi aplicada uma análise descritiva dos dados com Microsoft Excel. Em seguida foi avaliada a normalidade dos dados com o teste de Shapiro-Wilk (distribuição dos dados) e gráfico Q-Q plot. Outras análises como teste Mann-Whitney, teste de Kruskal-Wallis e Regressão de análise múltipla também foram utilizadas através da linguagem em R.

Os dados obtidos nos questionários foram submetidos a uma estatística descritiva e análise visual em gráficos. Todos os dados obtidos dos questionários foram registrados e tratados com a aplicação da estatística descritiva em planilha eletrônica.

5.0 RESULTADOS

5.1 Avaliação dos níveis de ^{222}Rn no ar dos cômodos das unidades habitacionais de Picuí e Nova Palmeira com aplicação de método estatístico paramétrico

Inicialmente foram elencados fatores externos que poderiam influenciar nos resultados das concentrações de ^{222}Rn no ar da área de estudo. Esses fatores estão associados a ventilação, aos materiais de construção utilizados, a origem da água consumida e aos diferentes usos de cômodos em uma residência.

Assim, no Quadro 7 tem-se essas variáveis elencadas, as quais foram consideradas no cálculo estatístico.

Quadro 7 - Fatores externos que foram avaliados para ocorrência de variação na concentração ^{222}Rn .

Itens	Descrição dos fatores que influenciaram as concentrações de ^{222}Rn
1	Cômodos avaliados: banheiro, cozinha e quarto
2	Quantidade de esquadrias: Janelas e portas
3	Fonte de água consumida
4	O acabamento utilizado na alvenaria: Tijolo exposto, emboço, pintura e cerâmica

Fonte: Autoria Própria (2022).

Como descrito na metodologia, seriam avaliados os quartos e banheiros, porém uma dificuldade encontrada na coleta de dados foi a inexistência de banheiros em algumas residências, sendo utilizadas fossas negras em áreas abertas no recuo posterior das casas. Nesses casos, o banheiro foi substituído pela cozinha, por também se tratar de uma área que utiliza água em suas atividades.

De posse dos dados das concentrações de ^{222}Rn do ar interno das residências, foi realizada uma análise descritiva dos resultados obtidos nos dois municípios e as diferenças entre os cômodos internos. Esses resultados estão descritos na Tabela 8.

Analisando os dados da tabela é possível identificar que as maiores médias das concentrações de ^{222}Rn no ar interno das residências, ocorreram nos ambientes dos banheiros de ambos os municípios. Esse resultado é justificado por serem locais pequenos, que geralmente possuem baixa ventilação, além de haver uma utilização constante da água, podendo volatilizar para o ar o ^{222}Rn .

Tabela 8 - Análise descritiva das concentrações de ^{222}Rn avaliados

Ambiente	Nova Palmeira		Picuí	
	M \pm DP	IC 95%	M \pm DP	IC 95%
Banheiro	8,09 \pm 8,17	3,56 – 12,61	7,05 \pm 5,94	5,69 – 8,34
Quarto	6,35 \pm 4,36	4,66 – 8,04	6,68 \pm 5,98	5,35 – 8,00
Cozinha	4,78 \pm 5,13	2,14 – 7,43	7,03 \pm 3,44	1,54 – 12,51

Fonte: Autoria Própria (2022).

Também foram identificados valores de médias muito semelhantes nas cozinhas do município de Picuí. Analisando o desvio padrão desse resultado, houve uma alta dispersão indicando uma maior variabilidade nos dados. As cozinhas, como já descrito, foram analisadas em caso da ausência de banheiro, sendo um número amostral pequeno e podendo explicar a alta dispersão das médias.

Estudos pioneiros realizados na China, Europa e América do Norte (LUBIN *et al.*, 2004; DARBY *et al.*, 2006; KREWSKI *et al.*, 2006) conseguiram relacionar a conexão entre maiores concentrações de radônio com ambientes fechados e o câncer de pulmão. O trabalho de Pantelié *et al.* (2019), mais recente, realizou uma revisão sistemática na Europa analisando o radônio em ambientes internos e confirmou a alta probabilidade de haver maiores concentrações de radônio em ambientes pequenos. Porém não foram encontrados relatos científicos publicados que analisassem a relação de ambientes internos em cômodos que fazem uso de água, comparado com os que não tinham essa finalidade.

Esse estudo trouxe como pioneirismo a análise da interferência do consumo de água em um ambiente nas concentrações de ^{222}Rn . Vale salientar que já é conhecido que o elemento água pode volatilizar o ^{222}Rn para o ar, porém nos estudos avaliados na revisão bibliográfica, a água foi desconsiderada como variável.

Considerando os demais resultados da Tabela 8, os quartos apresentaram médias muito semelhantes nos dois municípios e abaixo do limite de 100 Bq/m³ permitido, sendo acompanhados de valores do desvio padrão e intervalo de confiança que indicaram pouca dispersão dos dados e boa confiabilidade.

Em um estudo bastante semelhante, realizado no continente africano, no país de Gana, foram analisadas as concentrações de radônio no ar em quartos, no qual foram identificados valores que variaram de 23,7 a 125,9 Bq/m³ (OTOO *et al.*, 2020). Os maiores valores foram encontrados em ambientes com janelas pequenas e baixa ventilação, como também ao fechamento das portas e janelas durante a noite. Apesar da similaridade metodológica utilizada nas pesquisas, as características físicas dos ambientes no Seridó paraibano oriental variaram,

sendo edificações com coberturas em madeiramento e telha cerâmica, onde não há uma perfeita vedação do ambiente e permite a troca gasosa com o meio externo, além da existência de janelas amplas que melhoram a ventilação.

Mesmo sendo válidas as discussões tecidas sobre as concentrações de ^{222}Rn nos cômodos analisados, todos os valores estavam abaixo do limite máximo estipulado pela WHO, não oferecendo risco eminente as populações dos municípios. Porém, segundo Ramos (2020) a longo prazo a inalação de baixas concentrações também podem oferecer riscos à saúde humana.

Visando analisar melhor os possíveis riscos gerados, foi aprofundada a análise estatística aplicando o teste de hipótese “t”, para comparar as médias e identificar diferenças estatísticas nas concentrações de ^{222}Rn entre os dois municípios. O resultado do teste evidenciou que as médias de concentração de radônio não diferenciaram entre os municípios de Nova Palmeira e Picuí, obtendo um p valor maior do que 0,05 [$t(229) = 0,56$; $p = 0,572$] e podendo os dados serem avaliados em conjunto.

Em sequência foi aplicado o teste não-paramétrico de Mann-Whitney, que diferente do teste t, avalia a igualdade das medianas e não das médias comparando dois grupos. Os resultados corroboraram com o teste anterior, no qual foi obtido p valor maior do que 0,05 [$Z = -0,47$; $p = 0,633$] e que não encontrou diferença significativa entre os grupos comparados.

Em sequência para testar a normalidade dos dados, os resultados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk e a avaliação de medidas de dispersão de assimetria e curtose, obtendo como produto o gráfico Q-Q plot.

Para os dados das concentrações de ^{222}Rn no ar, a Tabela 9 obtêm os valores da avaliação de normalidade, que indicaram que os resultados foram ligeiramente assimétricos e curtóticos, o mesmo pode ser observado na Figura 29 do gráfico Q-Q plot, para cada município. Todas as avaliações indicaram que os dados fogem à normalidade, sendo indicado a aplicação de um teste não paramétrico.

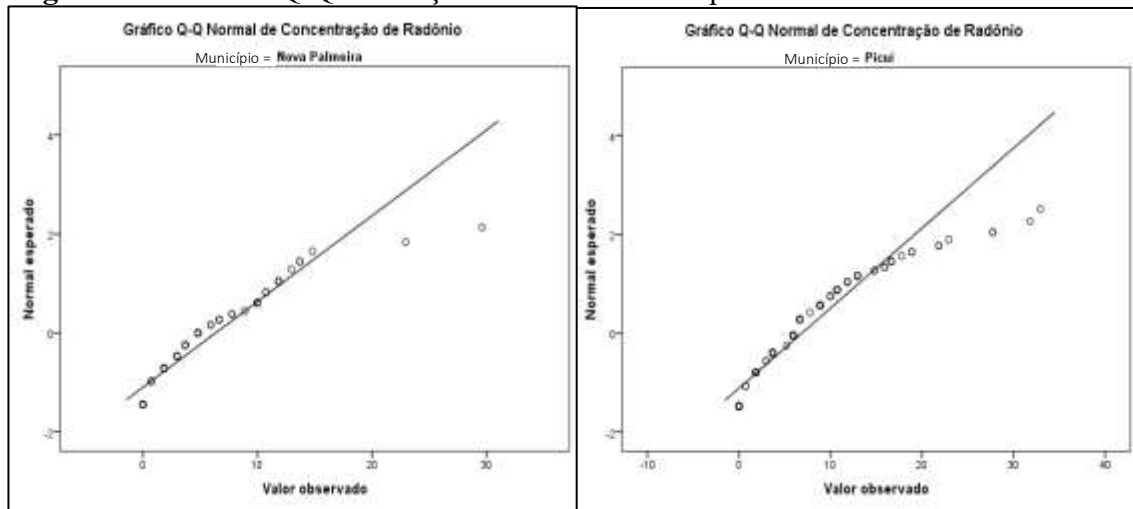
Tabela 9 - Assimetria, Curtose e Teste de Normalidade da concentração de radônio.

Ambiente	Nova Palmeira			Picuí		
	Assimetria	Curtose	S-W	Assimetria	Curtose	S-W
Banheiro	1,79	2,92	0,003	1,56	3,81	< 0,001
Quarto	0,44	-0,95	0,082	1,46	2,81	< 0,001
Cozinha	0,51	-1,62	0,002	1,19	2,12	0,528

Nota: S-W (p-valor do teste a normalidade dos dados Shapiro-Wilk). $P > 0,05$.

Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 29 - Gráfico Q-Q: avaliação de medidas de dispersão de assimetria e curtose



Fonte: Autoria Própria (2022).

Após a avaliação entre as concentrações de ^{222}Rn nos dois municípios foi verificado que não houve diferenças estatisticamente significantes entre os cômodos, além de todos estarem dentro do padrão estipulado pela WHO. No estudo desenvolvido por Medeiros (2020), ao qual avaliou a radioecologia efetiva para NORM em municípios do sertão da Paraíba e do Rio Grande do Norte, a dosimetria da mesorregião foi considerada como de baixo background, corroborando com os valores de baixa concentração de ^{222}Rn no ar encontrados nesse estudo.

Analisando comparativamente os cômodos que faziam uso de água com os que não faziam, constatou-se que houve maiores médias de concentração de ^{222}Rn no ar nos cômodos com a presença da água, o que pode ser um indicativo da interferência dessa variável, mas em baixas proporções não apresentando uma diferença estatisticamente significativa.

Em outro estudo realizado no Seridó oriental paraibano com rochas ornamentais, no qual foi verificada a exalação induzida em laboratório de ^{222}Rn para o ar, foram encontrados valores máximos de $215,0 \text{ Bq/m}^3$, porém quando simulado o uso das rochas em ambientes fechados, obtiveram valores dosimétricos inferiores ao limite sugerido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (AZEVEDO 2014; LEAL NETO, 2019). Essa avaliação coletou rochas do município de Pedra Lavrada, que faz divisa com Picuí e Nova Palmeira, e também pertence ao Seridó oriental paraibano. Tais dados indicaram que apesar do radônio estar contido na rocha não foi liberado para o ar em quantidades nocivas, não sendo um elemento somatório para as concentrações de ^{222}Rn no ar.

Todos esses relatos científicos, convergem para a existência do elemento radônio no meio ambiente do Seridó oriental, porém quando analisado isoladamente o ^{222}Rn no ar, há uma

predominância de serem encontradas baixas concentrações, como foi constatado por esse estudo.

5.2 Avaliação dos níveis de ^{222}Rn no ar Seridó oriental paraibano com aplicação de método estatístico não-paramétrico.

Devido a distribuição dos dados fugirem a normalidade, foram executados testes não paramétricos, Mann Whitney e Kruskal-Wallis para comparação da concentração de ^{222}Rn com todas as variáveis previamente identificadas, ou seja, por ambiente, fonte de água, características dos materiais de construção e esquadrias conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos testes não paramétricos (Mann Whitney e Kruskal-Wallis) para a concentração de radônio.

Ambiente	M ± DP	Mediana	Mann Whitney	
			Z	P
Banheiro (n = 95)	7,18 ± 6,30	5,92	-0,49	0,624 .(p<0,05)
Quarto (n = 109)	6,59 ± 5,59	5,92		
Fonte de água			χ^2	P
Chuva, açude ou barreiro (n = 31)	6,46 ± 5,19	5,92	2,31	0,677
Chuva (n = 8)	4,53 ± 3,97	4,25		
Poço (n = 29)	9,08 ± 9,16	6,66		
Poço e rede de abastecimento (n = 34)	7,07 ± 6,62	4,81		
Carro pipa (n = 94)	5,93 ± 4,64	5,92		
Característica			χ^2	P
Pintura (n = 128)	6,36 ± 5,57	5,92	5,81	0,121
Cerâmica (n = 69)	6,76 ± 4,72	5,92		
Tijolo Exposto (n = 27)	6,67 ± 7,48	3,70		
Emboço (n = 2)	24,79 ± 11,51			
Portas			Z	P
1 (n = 180)	6,99 ± 6,03	5,92	-1,74	0,162
2 (n = 2)	1,85 ± 1,56	1,85		
Janelas			χ^2	P
0 (n = 64)	5,81 ± 4,65	5,92	2,01	0,366
1 (n = 112)	7,64 ± 6,74	5,92		
2 (n = 6)	5,79 ± 1,95	5,92	Não houve linearidade	

Nota: Z (Estatística teste Mann-Whitney 2 grupos); χ^2 (Estatística teste Kruskal-Wallis- mais grupos p<0,05 houve diferença).

Fonte: Autoria Própria (2022).

Para avaliação da variável esquadrias, não foi encontrada linearidade dos dados, ou seja, as concentrações de ^{222}Rn no ar não indicaram correlação com a quantidade de esquadrias do ambiente. Esse resultado pode ter sofrido interferência das características construtivas das casas avaliadas na área de estudo. Geralmente as edificações avaliadas não possuíam lajes, sendo apenas coberturas com madeiramento e telhas cerâmicas, facilitando uma maior ventilação em direção de fluxo não controlado.

Nurrahim et al. (2021), em um estudo de modelagem matemática que visou identificar como ocorre a difusão do gás radônio em um ambiente fechado, verificaram que essa difusão depende de fatores como a velocidade do vento, temperatura e umidade do ambiente. Essas variáveis não foram verificadas nessa pesquisa, a qual podem sofrer interferência dos dados de acordo com o tamanho das aberturas das esquadrias, sendo sugerido para verificação em estudos futuros.

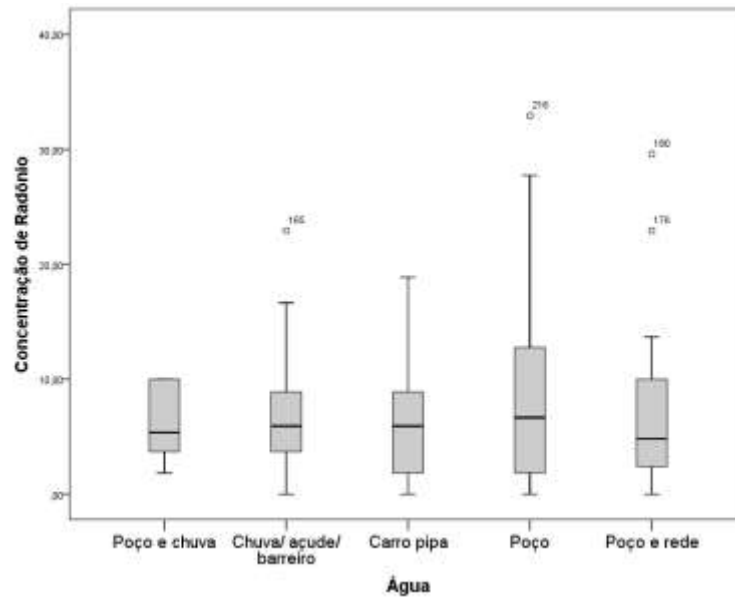
Para a avaliação da influência de fontes de água e materiais de construção com os dados obtidos da Tabela 10, foram criados subtópicos para detalhar e aprofundar as análises.

5.2.1 - Relação das fontes de água utilizadas e ^{222}Rn no ar

Na análise da variável fonte de água descrita na Tabela 10 observou-se que as opções que indicavam consumo de água subterrânea (poço) obtiveram valores de médias de ^{222}Rn mais elevados quando comparadas com as concentrações das casas que consumiam água de açude, chuva, barreiro e abastecimento através de carro pipa. No estudo desenvolvido por Milan (2020) no Seridó ocidental paraibano, foram identificados altos valores de ^{222}Rn na água subterrânea, chegando a 1.107 Bq.L^{-1} , resultado que evidenciou um risco do uso dessas águas para consumo humano. Outros estudos também identificaram a contaminação de águas subterrâneas através de ^{222}Rn no Nordeste brasileiro, como na região metropolitana do Recife e no estado da Bahia (AMARAL *et al.*, 2021; NOGUEIRA 2021; OLIVEIRA 2021). Essas pesquisas reforçam uma possível contaminação da água subterrânea nos municípios do Seridó oriental.

Também pode-se observar através da Figura 30, que os valores das medianas de todas as fontes de água foram bastante semelhantes e que o intervalo interquartil do consumo através de poço obteve uma maior dispersão dos dados, e uma alta amplitude constatada pelos valores máximos e mínimos.

Figura 30- Influência das fontes de água nas concentrações de ^{222}Rn no ar.

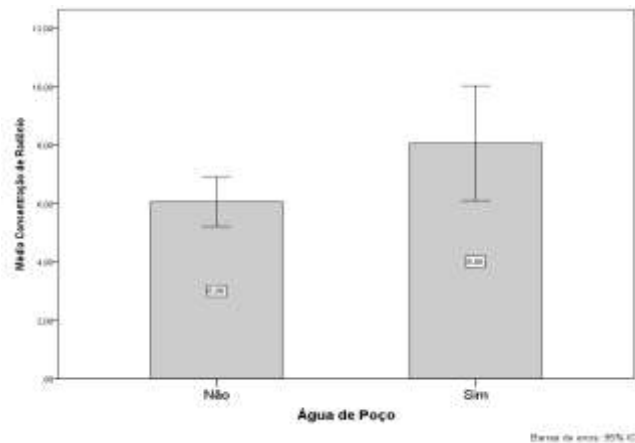


Fonte: Autoria Própria (2022).

Para tentar entender melhor o comportamento diferenciado da interferência das águas subterrâneas com as concentrações de ^{222}Rn no ar, foi aplicada aos dados uma regressão linear múltipla, com o método de entrada Forward, o qual se verificou a variável fontes de água com os valores de ^{222}Rn no ar, isolando a influência das demais variáveis. Todos os dados foram codificados em um modelo binário, sendo no modelo preditivo da concentração de radônio as fontes de água codificadas em 0 e 1 (Não/Sim).

Os dados indicaram que quem consumia água subterrânea em suas atividades diárias, possuía uma maior concentração de ^{222}Rn no ar de suas residências (Figura 31). Esse resultado foi estatisticamente significativo, sendo uma informação muito relevante, já que foram constatados longos períodos de intermitência de precipitações na região e um alto consumo de água de fontes alternativas.

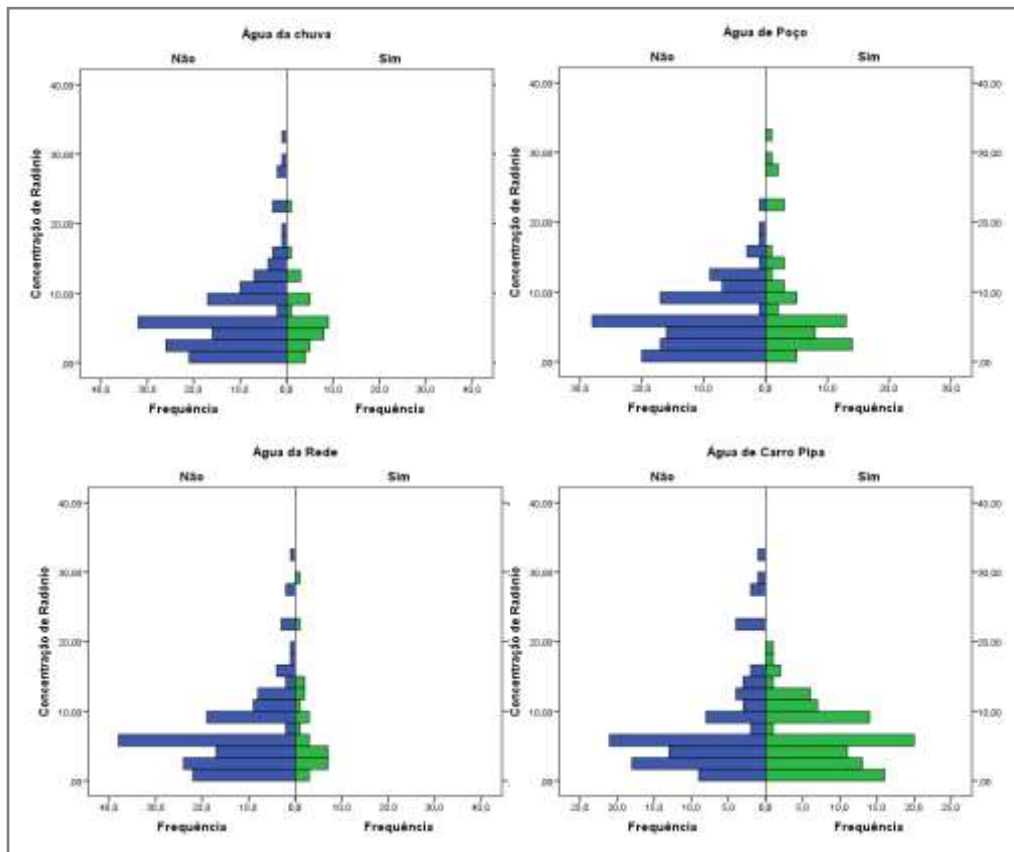
Figura 31 - Comparação de médias de ^{222}Rn no ar nos locais que faziam uso de água subterrânea



Fonte: Autoria Própria (2022).

Nas demais fontes de água, ao serem comparadas individualmente através do histograma, na Figura 32, pode ser verificado que o maior consumo de água foi através da aquisição de volumes por carro pipa e que a única variável que demonstrou correlação positiva com maiores concentrações de ^{222}Rn no ar foi a água subtraída do subsolo.

Figura 32 - Histogramas que correlacionam consumo de água e concentrações de ^{222}Rn no ar



Fonte: Autoria Própria (2022).

Após avaliação do histograma e verificação positiva de correlação entre a água subterrânea e níveis de radônio ^{222}Rn no ar, foi necessário avaliar em sequência os resultados obtidos com a água superficial dos açudes, para melhor entender a influência do gás radônio ao meio.

5.2.2 -Análise da influência dos açudes nas concentrações de radônio ^{222}Rn

Na Tabela 11 foram descritos os dados obtidos de ^{222}Rn no ar nas residências localizadas no entorno dos açudes Jandovi e Várzea Grande. Para realização da coleta de dados, foi considerada a distância linear mais curta entre as residências avaliadas e a margem do reservatório analisado. Todas as distâncias estão descritas na Tabela 11, associadas as concentrações por ambiente.

Tabela 11- Dados das residências próximas aos reservatórios superficiais

Residência	Açude Várzea Grande			Açude Jandovi		
	Distância ao corpo hídrico (m)	^{222}Rn no ar (Bq/m ³)		Distância ao corpo hídrico(m)	^{222}Rn no ar (Bq/m ³)	
		Quarto	Banheiro		Quarto	Banheiro
A	171	0,74	0,74	430	47,73	8,88
B	239	0,74	0,74	328	25,90	32,93
C	128	0,74	0,74	261	5,92	5,92
D	183	0,74	0,74	298	10,73	1,85
E	209	0,74	0,74	214	13,69	8,88
F	128	7,77	7,77	191	17,76	13,69
G	121	6,66	6,66	242	6,66	0,74
H	95	0,74	0,74	193	5,92	21,83
I	76	0,74	0,74	154	17,76	8,88
J	95	0,74	0,74	140	6,66	1,85
L	192	0,74	0,74	162	3,70	9,99
M	169	0,74	0,74	168	17,76	5,92
N	423	0,74	0,74	146	8,88	11,84
O	274	0,74	0,74	-	-	-

Fonte: Autoria Própria (2022).

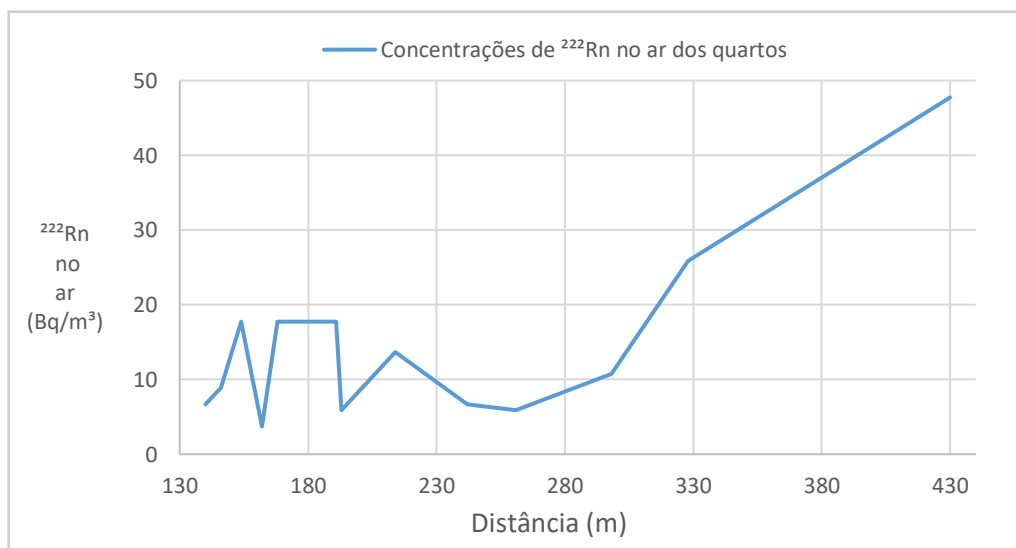
Em destaque na cor azul na Tabela 11, estão as concentrações de ^{222}Rn no ar nas edificações com maior e menor distância ao açude Várzea Grande. Nas duas coletas os dados

foram idênticos a $0,74 \text{ Bq/m}^3$, sendo registrado esse mesmo valor nas amostras A, B, C, D, E, H, I, J, L, M, N e O. Mesmo havendo a variação de distâncias das residências ao reservatório, nos resultados obtidos não foi possível identificar uma correlação entre o Várzea Grande e o ^{222}Rn no ar, pois não houve uma linearidade dos dados quando comparadas as oscilações das variáveis.

Já no açude Jandovi, na Tabela 11 foram representados na cor laranja os pontos de maior e menor distância linear. Igualmente aos resultados obtidos nas proximidades do açude Várzea Grande, o ar interno dos banheiros avaliados próximos ao açude Jandovi apresentaram dados de ^{222}Rn que oscilaram aleatoriamente, não podendo ser relacionado a variação das distâncias.

Para avaliação dos dados obtidos no ar interno dos quartos, foi gerado o gráfico representado na Figura 33 para melhor análise. Até os 300 m de distância entre as residências e o açude Jandovi, houve uma oscilação das concentrações de radônio 222 no ar de forma aleatória, que variou entre $3,7$ a $17,7 \text{ Bq/m}^3$, não sendo linear com o aumento da distância. Esse trecho obteve 84,6 % das amostras analisadas nos quartos. O trecho acima de 300 m que demonstrou um crescimento ascendente com as concentrações de ^{222}Rn , representou apenas duas amostras do total avaliado, podendo ser um ponto outliers já que também contrapõe a hipótese de quanto mais próximo do açude maior a presença de radônio 222. Devido a esse cenário sugere-se aprofundar o estudo nas edificações que distam mais de 300m do corpo hídrico.

Figura 33- Avaliação do ^{222}Rn no ar nos quartos próximos ao Açude Jandovi



Fonte: Autoria Própria (2022).

Nos dois açudes avaliados, não foi possível identificar uma correlação positiva ou negativa do radônio 222 presente no ar com a proximidade aos reservatórios superficiais. Todos os valores obtidos das concentrações de ^{222}Rn estavam abaixo do limite de 100 Bq/m³ estipulado pela WHO, podendo essas oscilações aleatórias dos valores de radônio 222 serem explicadas pela intensa troca de fluxos de ventilação existentes nas residências que possuem apenas a vedação superior com telhado.

5.2.3 *Questionário: Fonte de água e ^{222}Rn*

Foram aplicados 157 questionários, sendo 93 em Picuí e 64 em Nova Palmeira. Os grupos abordados foram: Amostra em branco; pacientes com neoplasias; garimpeiros e pessoas que residiam nas casas em que foram avaliadas as concentrações de ^{222}Rn .

Foi perguntado aos entrevistados qual fonte de água era utilizada em sua residência. Apenas 9,5% da amostra analisada utilizava uma única fonte de água, não sendo a rede de abastecimento. As fontes citadas foram água da chuva ou carro pipa, cenário delineado pela intermitência no sistema de abastecimento público. Os demais 90,5% dos entrevistados responderam que utilizavam duas ou mais fontes alternativas, sendo além das já citadas, água advinda de poço e água mineral engarrafada. Porém apesar das várias fontes indicadas, todos responderam qual era a fonte de uso prioritário em sua residência.

Para traçar uma relação com Rn^{222} foram cruzados os dados das fontes de água utilizadas com os pacientes que possuíam câncer. Devido a neoplasia ser uma patologia que pode ser gerada por inalação ou ingestão do ^{222}Rn , foi analisado isoladamente o grupo que declarou possuir câncer.

Uma parcela de 83,4% dos pacientes que possuíam neoplasia declarou utilizar água de poço como principal fonte de abastecimento em sua residência. Mas apesar da aparente correlação, tentou-se avaliar outros fatores de interferência que gerassem a doença (Quadro 8).

Quadro 8- Descrição das respostas dos entrevistados de variáveis que poderiam gerar câncer.

Identificação	Local da Neoplasia	Garimpeiros	Fumantes	Gastrite	Fonte de água
Morador A	Próstata	x	x		Chuva
Morador B	Mama			x	Subterrânea
Morador C	Estômago				Subterrânea
Morador D	Estômago				Subterrânea
Morador E	Tireóide	x		x	Subterrânea
Morador F	Pulmão			x	Subterrânea

Nota: X Resposta afirmativa; - Resposta negativa.

Fonte: Autoria Própria (2022).

Foram investigados fatores como o fumo e problemas de saúde, como a gastrite, gerados por maus hábitos alimentícios, além da atividade laboral de extração mineral. Do Quadro 8 é possível identificar que 20% da amostra é composta por garimpeiros, porém as neoplasias na próstata e tireoide não são patologias decorrentes da inalação ou ingestão do Rn^{222} . Além desse fato metade dos que declararam ser garimpeiros não utilizavam água de poço, sendo um dado difícil de correlação com a ocorrência através do ^{222}Rn .

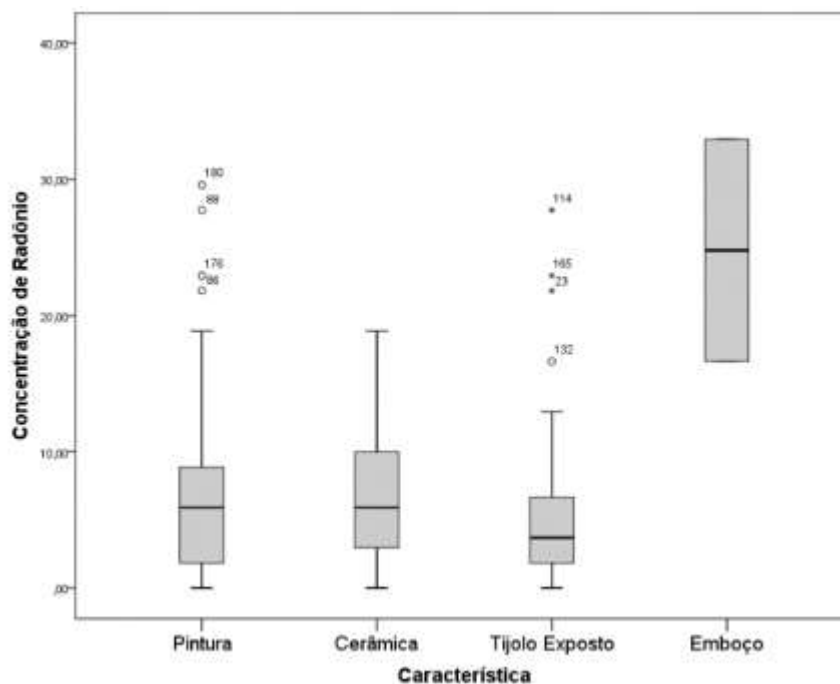
Outro detalhe importante a ser verificado, é que 100% dos pacientes que apresentavam neoplasia no pulmão ou no estômago, consumiam água subterrânea, além de não possuírem hábitos como o fumo ou patologias pré-existentes como a gastrite. Tais dados demonstram fortes indícios para uma correlação entre o ^{222}Rn e o consumo de água subterrânea. O risco dessa contaminação radiológica na água é detectado em estudos, como o de Ullah *et al.*, 2022 realizado no Paquistão. Foi avaliado a presença de ^{222}Rn em água subterrânea e identificou que todas as amostras analisadas ultrapassaram o limite do nível máximo de contaminação de 11,1 Bq/L estabelecido pela US-EPA (ULLAH *et al.*, 2022). Após essas constatações é importante que novos estudos sejam realizados para avaliar as concentrações radiológicas da água do Seridó paraibano oriental e, desse modo, reforçar os resultados obtidos na presente pesquisa.

5.3 Materiais de construção e ^{222}Rn

Com relação as características dos materiais de construção (Tabela 10), os acabamentos das alvenarias não demonstraram grande diferenciação de suas médias, exceto as casas com emboço. Essas residências obtiveram uma média 273% maior do que a média verificada para a variável pintura.

Na Figura 34 também foram observados valores mais altos para emboço quando comparados ao primeiro, segundo e terceiro quartil dos demais revestimentos avaliados. No entanto, a ausência dos valores máximo e mínimo, reforçou o indicativo de um número amostral muito baixo, sendo listadas apenas duas residências com emboço e devendo ser desconsiderado nessa pesquisa.

Figura 34 - Influência dos materiais de construção nas alvenarias nas concentrações de ^{222}Rn no ar

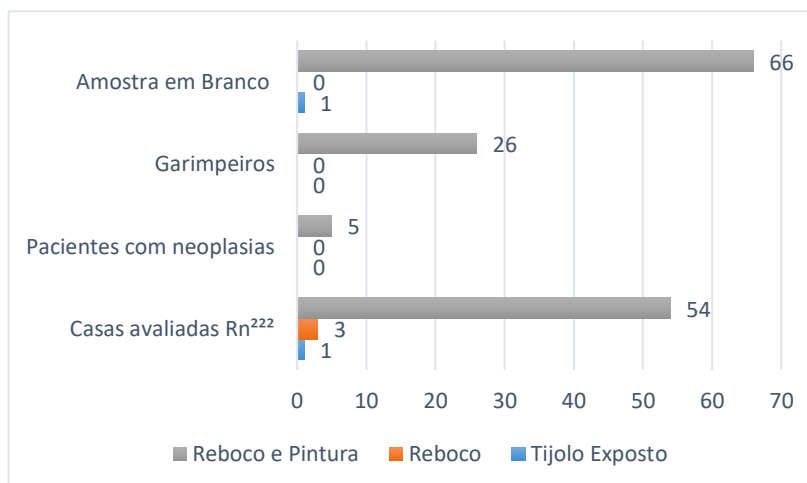


Fonte: Autoria Própria (2022).

Outros estudos também relataram que não foram encontradas correlações entre as concentrações de ^{222}Rn e os materiais de construções e que fatores como ventilação do ambiente podem influenciar mais na variável (MIRDORAGHI *et al.*, 2020; SYURYAVIN *et al.*, 2020).

5.3.1 *Questionário: Materiais de construção e Rn^{222}*

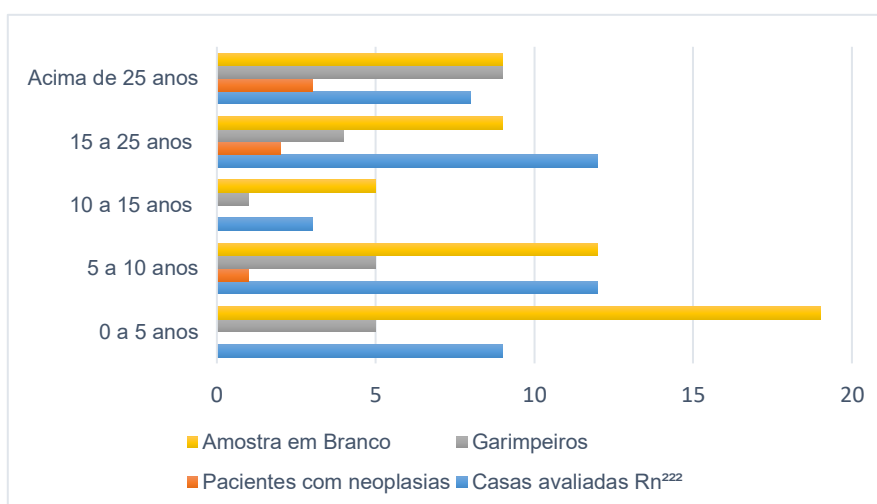
Com relação ao revestimento utilizado na alvenaria, foram identificadas predominâncias acima de 95% de reboco e pintura nas residências dos dois municípios. Na Figura 35 observou-se que em todos os grupos analisados houve a ocorrência em maior proporção desses revestimentos, sendo os únicos encontrados nas moradias dos garimpeiros e pacientes com neoplasia. Porém, não foi possível afirmar nenhuma correlação desses materiais com o grupo de pacientes com neoplasia e garimpeiro, já que todos os grupos avaliados possuíam, em maior proporção, essa mesma característica.

Figura 35- Acabamento da alvenaria nas residências dos entrevistados.

Fonte: Autoria Própria (2022).

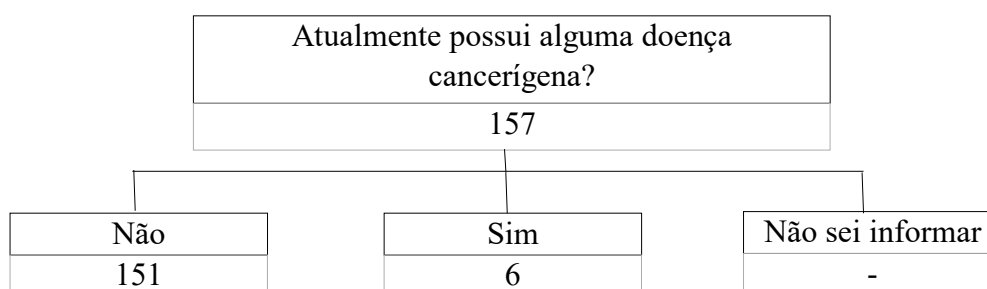
As variáveis tijolo exposto e reboco foram identificadas em apenas 3,18% dos locais avaliados, não sendo característico a nenhum dos grupos e não havendo indícios de correlação com as concentrações de ²²²Rn. No entanto, de acordo com o estudo realizado por Shurgashti, *et al.* (2022) foram encontradas maiores concentrações de ²²²Rn em edificações com tijolos expostos. Outro fator de influência constatado por Shurgashti *et al.* (2022) foi uma relação proporcional entre a concentração de ²²²Rn e o tempo em que as pessoas residiam em uma edificação. Por esse fato, esse critério foi abordado no questionário.

Com os dados obtidos em Picuí e Nova Palmeira (Figura 36) foi possível constatar que 49,2% da população já habitava em suas residências entre 0 a 10 anos. Nos demais intervalos avaliados, o item “acima de 25 anos” foi o mais citado com 22,6%. Com relação ao grupo de pacientes com neoplasia, foi possível identificar um crescimento proporcional com a variável tempo de moradia. Exceto a opção 10 a 15 anos, os demais intervalos de tempo indicaram uma alta na ocorrência da doença. Houve o aumento de 300% da patologia comparando a opção de 5 a 10 anos com a de mais de 25 anos.

Figura 36- Tempo de moradia dos entrevistados

Fonte: Autoria Própria (2022).

Avaliando isoladamente esses pacientes com câncer que participaram da análise anterior, foi possível identificar qual neoplasia era mais recorrente nos entrevistados. A Figura 37 detalha em forma de fluxograma que 33,4 % dos entrevistados afirmaram ter câncer de estômago, seguidos de 16,6% de câncer de pulmão, 16,6% de leucemia e 33,4 de outras neoplasias, como câncer de mama e tireoide.

Figura 37- Fluxograma dos entrevistados que possuíam neoplasia.

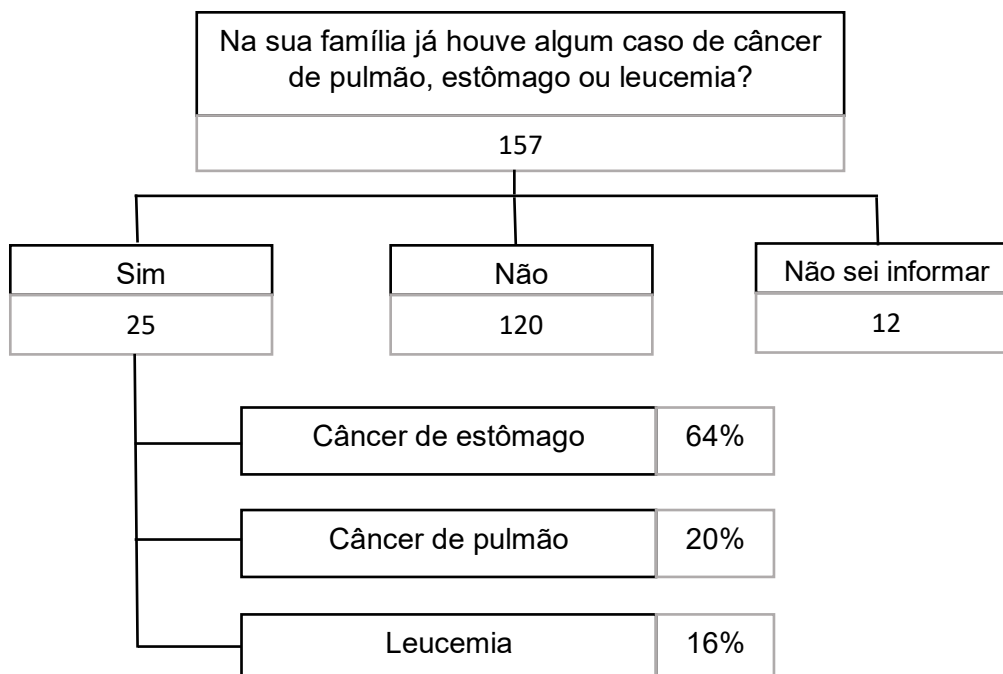
Fonte: Autoria Própria(2022).

Esses dados corroboraram com a estatística previamente analisada nesse estudo indicando que a incidência de câncer de estômago nesses municípios foi alta, sendo maior do que a média nacional. Para os casos de leucemia e pulmão, também foram encontrados valores altos, sendo as duas neoplasias, juntamente com câncer de estômago, patologias que podem ser desenvolvidas pela inalação do ²²²Rn.

Também foi perguntado no questionário, visando avaliar um histórico maior dos habitantes, se algum familiar que possuísse residências em um dos dois municípios, havia apresentado algumas das neoplasias analisadas (Figura 38). Mais uma vez os resultados

indicaram a alta incidência do câncer de estômago na população, sendo 64% dos familiares dos entrevistados acometidos por essa patologia. Também foi registrada a ocorrência de 36% somando-se os casos de leucemia e câncer de pulmão.

Figura 38- Fluxograma dos familiares dos entrevistados que possuíam neoplasia.



Fonte: Autoria Própria (2022).

5.4 Avaliação dos garimpos no Seridó paraibano

Com relação a análise do grupo de garimpeiros, foram entrevistados 44 profissionais, sendo 4,5% desses portadores de câncer. Esse dado indica uma alta proporção de acometimento da doença nesse grupo, porém nenhuma das neoplasias relatadas vinculadas a ocorrência do ^{222}Rn . Esse fato, enfraquece o vínculo do ^{222}Rn como fator gerador de neoplasias em garimpeiros dessa região, podendo ser gerados através de fatores hereditários ou hábitos alimentares.

Também foram avaliadas as concentrações ^{222}Rn em garimpos ativos e inativos no Seridó oriental. As concentrações variaram de 6,66 a 22,94 Bq/m³ e não houve diferenças estatisticamente significantes entre os ativos e inativos. De acordo com Francisca (2019) os ambientes de mineração são mais suscetíveis a conter o ^{222}Rn , por emanar do solo ou das rochas o gás. Um outro estudo realizado por Hanfí (2019) analisou garimpos subterrâneos no Egito e relatou encontrar altas concentrações ^{222}Rn no ar, acima dos limites permitidos.

No entanto, todos os garimpos do Seridó paraibano analisados, Morro do cuscuz, Alto das Panelas, Tanquinhos, Alto da Quixabeira, Chico Amaro, Caranguejo, Sitio das Onças e Clementino, eram superficiais permitindo uma ampla ventilação e inexistindo o confinamento de ambientes fechados (Figura 39 e 40), sendo justificadas as baixas concentrações encontradas.

Figura 39- Garimpo morro das panelas no município de Picuí-PB



Fonte: Autoria Própria (2022).

Também foi possível identificar nos garimpos, uma intensa degradação ambiental por atividades antrópicas na superfície rochosa, formando verdadeiros vales e mudando a paisagem natural, impactando assim a fauna e a flora local.

Figura 40- Garimpo morro do cuscuz no município de Picuí-PB



Fonte: Aatoria Própria (2022).

Como os garimpos estão localizados em áreas abertas e muito ventiladas foi necessário posicionar o aparelho eletrônico em fendas ou abrigos improvisados com pedras, conforme ilustrado na Figura 41, e desse modo, garantir a integridade do aparelho e permitir a estabilidade necessária para a coleta segura dos dados das concentrações de Radônio nesses ambientes.

Figura 41- Adaptação do abrigo para leitura do ^{222}Rn em Garimpos



Fonte: Aatoria Própria (2022).

Apesar das leituras de ^{222}Rn no ar terem constatado baixas concentrações, foi necessário avaliar através do questionário as condições de trabalho dos minerados como o uso de EPI- Equipamento de proteção individual, e a quantidade de horas trabalhadas, que poderiam influenciar na ocorrência de doenças neoplásicas e em uma maior inalação de ^{222}Rn no ar a longo prazo.

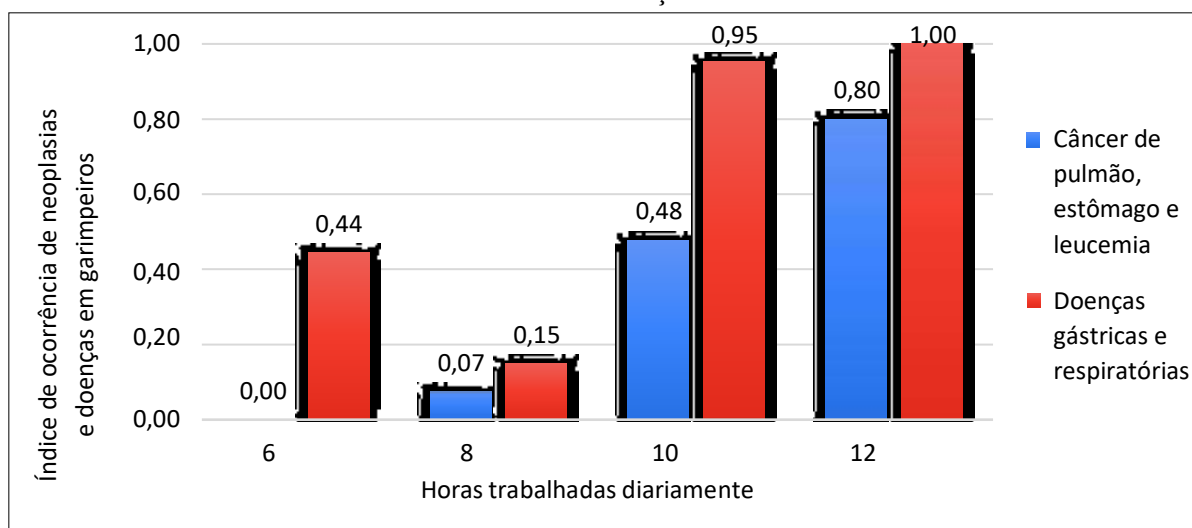
5.4.1 Influência da jornada de trabalho e uso de EPIs dos mineradores em relação ao desenvolvimento de doenças gástricas e respiratórias

Dentre as respostas obtidas dos garimpeiros, 45,16% dos mineradores trabalhavam no município de Picuí, 30,6% de Frei Martinho, 21% de Pedra Lavrada e 3,2% de Nova Palmeira.

Os materiais mais extraídos nos ambientes de mineração, segundo respostas dos mineradores, eram feldspato, mica, quartzo róseo e branco, granito e colombitas. Dentre esses, o granito, por ser constituído de sílica, pode comprometer a saúde dos mineradores devido a inalação desse material (CARNEIRO *et al*, 2002). Em relação aos demais, não há comprovação científica de que estejam diretamente relacionados a doenças respiratórias ou gástricas.

As informações relacionadas ao número de horas trabalhadas diariamente pelos mineradores e a ocorrência de doenças neoplásicas no pulmão, estômago e no sangue foram descritas na Figura 42.

Figura 42 - Desenvolvimento de doenças relacionadas ao número de horas diárias trabalhadas na mineração

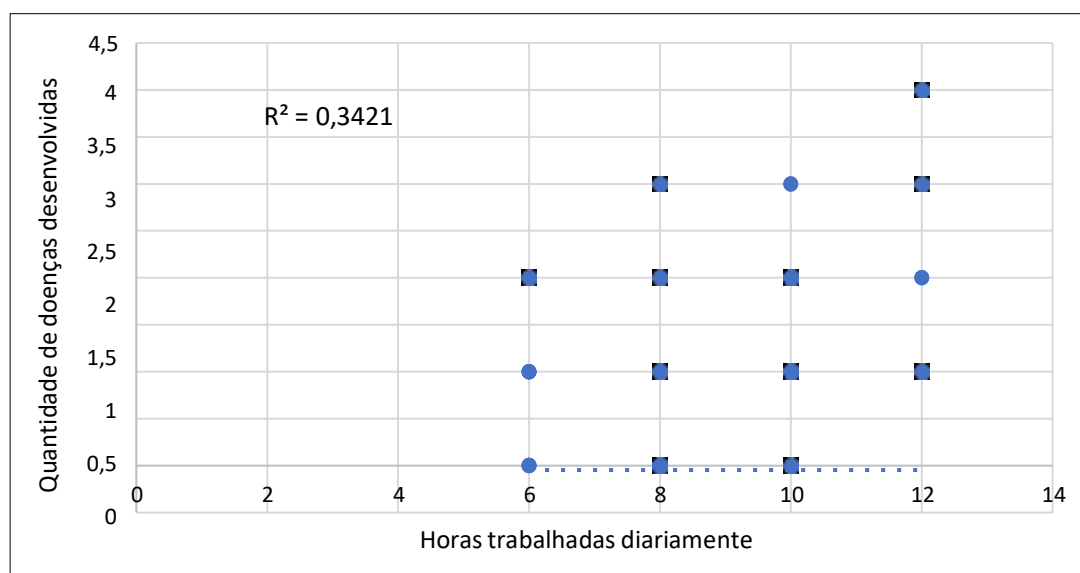


Fonte: Autoria Própria (2021).

Percebe-se que houve um crescimento ascendente entre o número de horas trabalhadas e a ocorrência de neoplasias a partir das 8h de jornada diária. Entre os que possuíam jornada de trabalho de 10 a 12 horas, 95% e 100%, respectivamente, desenvolveram doenças gástricas e respiratórias. No entanto, existem outras variáveis que podem influenciar nesse resultado, hábitos alimentares podem gerar gastrite seguido do desenvolvimento de câncer de estômago e o fumo pode ocasionar câncer de pulmão (SALES *et al.*, 2017; BOMFIM *et al.*, 2020).

Através do software XLSTAT foi realizada uma análise de correlação entre o número de horas trabalhadas diariamente e a quantidade de doenças estomacais e gástricas nos mineradores que responderam ao questionário, sendo estabelecido um nível de significância de 5%. Na Figura 43 foi ilustrado o gráfico de dispersão.

Figura 43 - Gráfico de dispersão entre a quantidade de horas trabalhadas diariamente e o número de doenças desenvolvidas pelos mineradores



Fonte: Autoria Própria (2021).

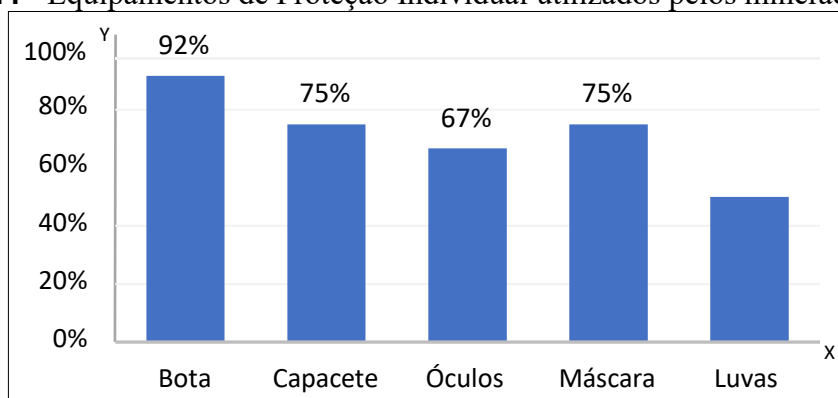
Ao aplicar o teste, obteve-se um coeficiente de correlação de $\rho = 0,585$ e um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,342$. O resultado indica uma moderada correlação positiva e que 34,2% das doenças desenvolvidas pelos mineradores pode ser explicada pela jornada de trabalho. Dessa forma, entende-se que quanto maior o número de horas trabalhadas, maiores são as chances de desenvolvimento de doenças ocupacionais.

De acordo com a NR-22 (Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração) as empresas de mineração deveriam fornecer aos seus funcionários equipamentos de proteção individual de uso obrigatório (EPI) (BRASIL, 2021b). Esses equipamentos também estão previstos na NR-

6 (Norma Regulamentadora: Equipamento de Proteção Individual) (BRASIL, 2021c).

No entanto, devido à grande informalidade da mineração na região, 61% dos garimpeiros que responderam o questionário não utilizam nenhum tipo de equipamento de proteção individual e 39% utilizavam pelo menos um EPI, como botas, luvas, máscara, capacete e óculos. Os equipamentos mais utilizados pelos garimpeiros do Seridó Paraibano estão ilustrados na Figura 44.

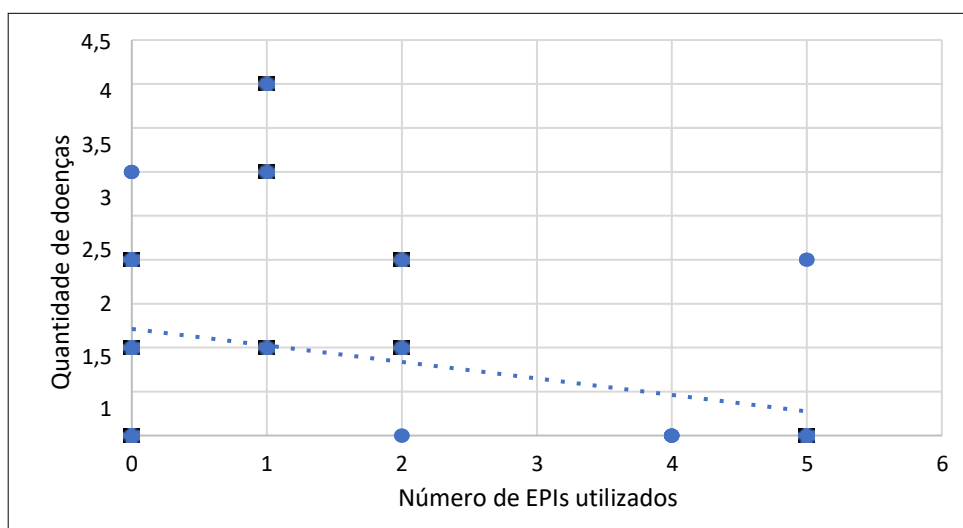
Figura 44 - Equipamentos de Proteção Individual utilizados pelos mineradores



Fonte: Autoria Própria (2021).

Utilizando o software XLSTAT, realizou-se uma análise de correlação entre a quantidade de EPIs utilizados e a quantidade de doenças estomacais e gástricas nos mineradores que responderam ao questionário, com nível de significância de 5%. Na Figura 45 foi apresentado o gráfico de dispersão.

Figura 45 – Gráfico de dispersão entre a quantidade de EPIs utilizados e o número de doenças desenvolvidas pelos mineradores



Fonte: A autora (2021).

Obteve-se um coeficiente de correlação de $\rho = -0,367$ e um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,134$. O resultado indica uma moderada correlação negativa e que 13,4% das doenças desenvolvidas pelos mineradores podem ser explicadas pela baixa utilização de equipamentos de proteção. A partir dos valores encontrados, infere-se que quanto menos EPIs são utilizados pelos garimpeiros, maior a probabilidade de surgimento de doenças. De acordo com Nascimento 2019, a vulnerabilidade desses garimpeiros é agravada por possuírem pouco conhecimento sobre os fatores de risco, como o contato direto e prolongado com a água, exposição solar e por habitarem por longas jornadas em ambientes insalubres sem o uso de EPIs.

Além disso, foi verificado que ainda existia uma resistência muito grande por parte dos mineradores em utilizar os equipamentos fornecidos. Dentre os EPIs mais utilizados, destacam-se bota, capacete e máscara. Analisando as respostas dos questionários, percebeu-se que nenhum dos garimpeiros utilizava protetor auricular, mesmo que seja um equipamento individual obrigatório.

Assim, o uso desses equipamentos foi negligenciado, promovendo a exposição dos próprios mineradores à diversos riscos, como físicos, químicos e aumentando a probabilidade de desenvolvimento de doenças gástricas e respiratórias, como evidenciado através do coeficiente de correlação.

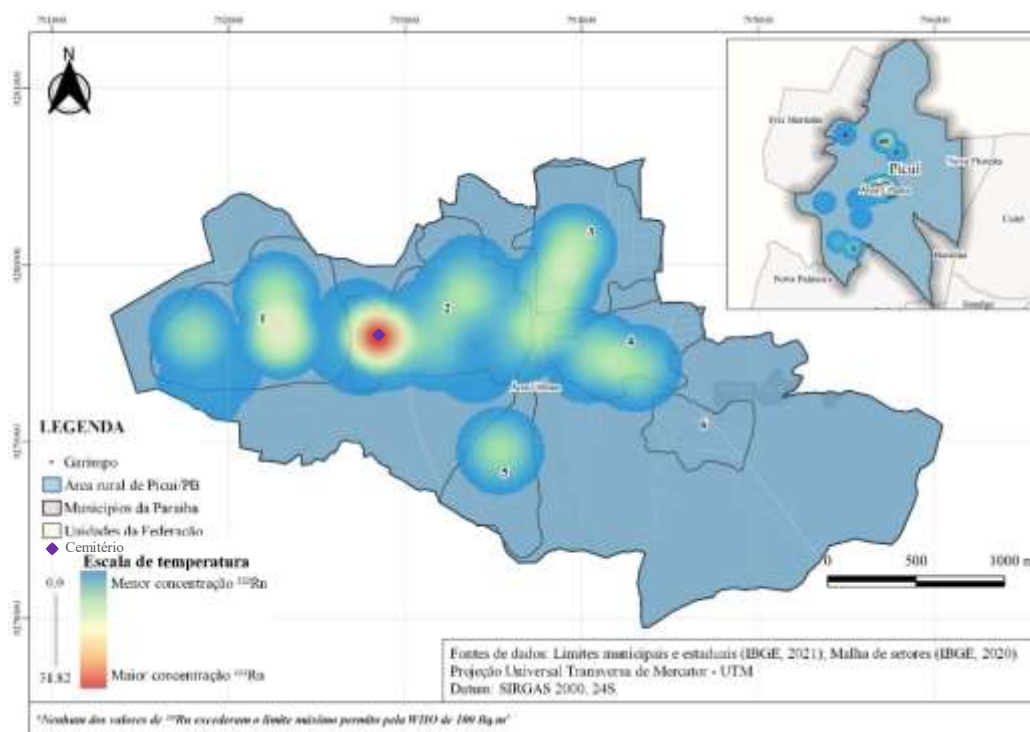
5.5 Mapeamento das concentrações de ^{222}Rn no ar em Picuí e Nova Palmeira

Apesar das concentrações de ^{222}Rn no ar estarem abaixo dos limites estipulados pela UNSCEAR e a WHO, conforme verificado nessa pesquisa, é importante identificar os setores dos municípios Picuí e Nova Palmeira que registraram os valores mais altos e apontar áreas mais críticas onde a população está mais exposta ao risco. Desse modo, os dados obtidos de concentrações ^{222}Rn foram especializados e estão apresentados nas Figuras 46 e 47 para Picuí e Nova Palmeira, respectivamente. No município de Picuí, na região 2 da Figura 46, foram identificados os maiores níveis radioativos, sendo o maior valor de $31,82 \text{ Bq/m}^3$. Nas demais áreas, incluindo a zona rural e os garimpos, os valores foram inferiores. Através da espacialização de dados, também foi possível observar que não houve uma área com raio extenso de maiores valores de ^{222}Rn .

Os pontos de maior incidência de ^{222}Rn no ar na segunda região no município de Picuí, foram nas residências localizadas nas proximidades do cemitério, podendo a alta concentração de materiais graníticos nos túmulos e de concreto terem contribuído para impulsionar essa alta

de radiação na vizinhança. Ainda na região 2, onde houve uma maior concentração de radiação, havia uma extensa área de solo exposto, não sendo povoada nem pavimentada, podendo também interferir nos resultados devido a exalação do ^{222}Rn para o ar.

Figura 46- Espacialização do ^{222}Rn no ar no município de Picuí-PB

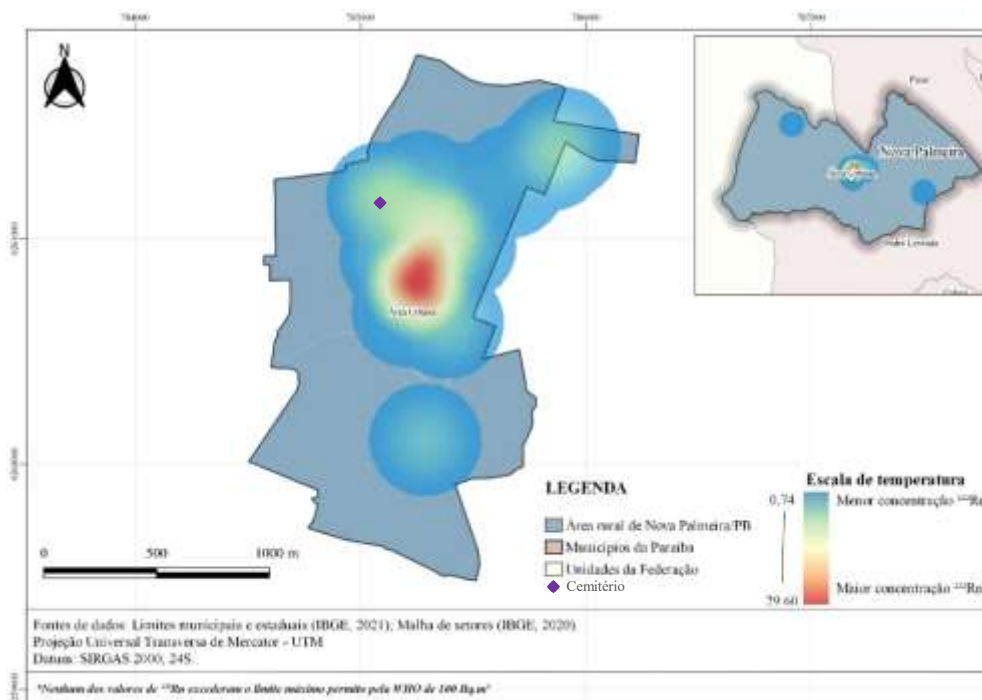


Fonte: Autoria Própria (2022).

Já no município de Nova Palmeira-PB, Figura 47, é verificada uma maior concentração na zona sul da malha urbana, sendo o valor máximo registrado de 29,60 Bq/m³ e menor do que o encontrado em Picuí-PB. Diferentemente de Picuí-PB, o cemitério municipal em Nova Palmeira está localizado fora da área crítica (região em vermelho no mapa), porém com uma pequena distância (250 m) para o início dela. No entanto, na região de maior concentração de ^{222}Rn há uma grande área de solo exposto, podendo também nesse município ser um fator agravante.

Nos pontos avaliados com maior intensidade nos dois municípios, não havia proximidade com garimpos. Porém, todos os maiores valores obtidos foram verificados nos banheiros das residências, já que conforme explicado no item 5.1, são ambientes pequenos e com baixa incidência de ventilação natural.

Figura 47- Espacialização do ^{222}Rn no ar no município de Nova Palmeira-PB



Fonte: Autoria Própria (2022).

5.6 Dose efetiva

Todos os resultados dispostos nessa sessão seguiram uma sequência de cálculo para definir a quantidade de casos de câncer de pulmão que podem ser gerados pelo ^{222}Rn no ar a cada ano no Seridó paraibano. Foram utilizadas quatro equações no total, sendo da Equação 3 a 6, descritas no tópico 4.33 pertencente a metodologia.

O primeiro resultado encontrado foi o cálculo da dose efetiva anual do Seridó Oriental paraibano, o qual utilizou a Equação 3.

$$AED = 0,45 \text{ mSv/ano}$$

AED = dose efetiva anual.

Na sequência, para descobrir o risco de câncer de pulmão para a população, foi necessário calcular a dose efetiva anual resultante para os pulmões (*AEDL*) da exposição a ambientes internos com gás radônio para os habitantes do Seridó Oriental paraibano, através da Equação (4).

$$AEDL = 1,08 \text{ mSv/ano}$$

$AEDL$ = dose efetiva anual resultante para os pulmões.

O excesso de risco de câncer pulmonar ao longo da vida ($ELCR$) ligado as doses efetivas anuais resultantes para cada residência foram calculadas usando a Equação (5).

$$ELCR = 1,9 \text{ (grandeza adimensional)}$$

$ELCR$ = Excesso de risco de câncer de pulmão ao longo da vida ($ELCR$)

Por fim, para definir a quantidade de casos que podem ser gerados pelo ^{222}Rn no ar a cada ano, foi utilizada a Equação 6.

$$LCC = (15,1 \text{ a } 28,4) \text{ casos/milhão de pessoas x ano}$$

LCC = Casos de câncer pulmonar ocasionados por ^{222}Rn no ar.

O LCC encontrado variou de 15,1 a 28,4 por milhão de pessoas por ano com o valor médio de 21,9 por milhão de pessoas por ano. O resultado indica que a cada um milhão de pessoas que habitam o Seridó paraibano por ano, 8,1 indivíduos irão adoecer de câncer de pulmão devido a inalação por ^{222}Rn no ar. Para Verde *et al.*, 2022 durante o período da pandemia de COVID 19 o valor do risco radiológicos por ^{222}Rn aumentou em 9% devido ao confinamento das pessoas em suas residências.

No entanto, mesmo considerando o aumento por confinamento proposto por Verde *et al.*, 2022, o resultado encontrado foi bem abaixo da faixa mundial de 170 a 230 por milhões de pessoas, sendo considerado uma exposição de baixo risco.

6.0 ANÁLISE GLOBAL

Esse estudo tentou explorar diferentes variáveis possíveis que poderiam influenciar nas concentrações de ^{222}Rn no ar do Seridó paraibano. A presença desse elemento radioativo foi confirmada em todos os ambientes analisados, desde residências aos garimpos, porém em 100% das avaliações os valores estavam abaixo do valor máximo recomendado pelas diretrizes da WHO que é de 100 Bq/m^3 . Após essa constatação, buscou-se isolar cada variável analisada e identificar o seu impacto para as concentrações de ^{222}Rn no ar.

No Quadro 9 foram listadas todas as variáveis avaliadas e se houve uma correlação estatisticamente significativa.

Quadro 9 – Resumo das correlações entre o ^{222}Rn e as variáveis analisadas

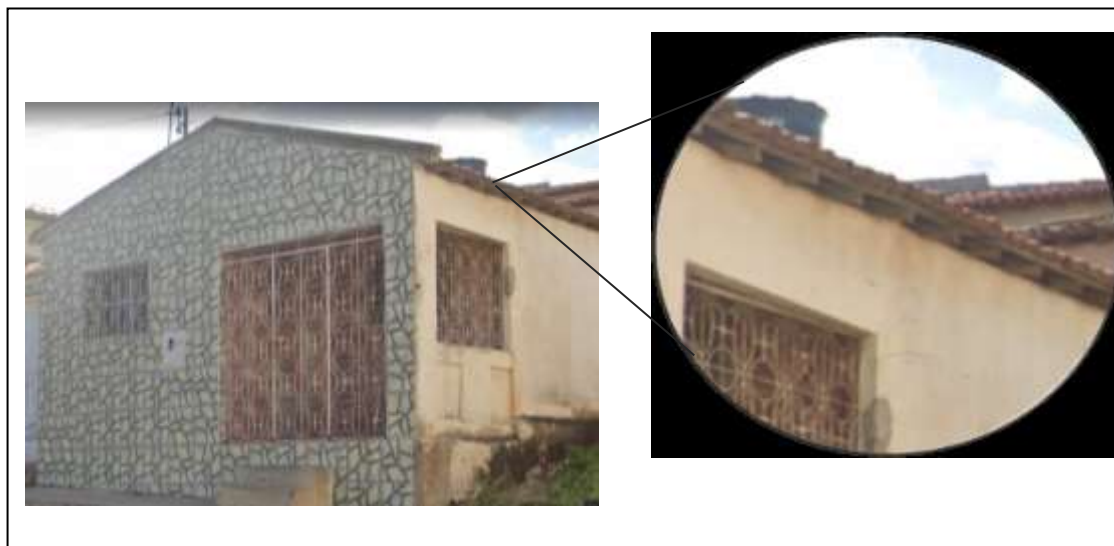
	Variáveis	Correlação estatística
Radônio 222 no ar	Água subterrâneas	Positiva
	Água superficial	Insignificante
	Materiais de construção	Insignificante*
	Esquadrias	Insignificante
	Cômodo banheiro	Insignificante*
	Cômodo quarto	Insignificante
	Cômodo cozinha	Insignificante
	Garimpos	Insignificante

Obs: *Correlação estatisticamente insignificante, porém com algum dado que foi diferenciado e explicado no texto.

Fonte: Autoria própria (2022).

As variáveis que demonstraram uma correlação insignificante no Quadro 9 não corroboram com muitos estudos realizados em âmbito internacional (MIRDORAGHI et al., 2020; SYURYAVIN et al., 2020; SHURGASHTI, et al., 2022; ULLAH et al., 2022). No entanto, algumas características únicas do Seridó paraibano contribuíram para esses resultados. As condições de precipitações escassas, altas temperaturas, ventos intensos além das características socioeconômicas que influenciam no padrão construtivo das moradias foram possíveis influências nos dados obtidos. Na Figura 48 é possível identificar um modelo padrão das edificações da área de estudo.

Figura 48- Modelo construtivo padrão nas edificações avaliadas da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2022).

As edificações permitiam uma boa ventilação cruzada com a existência de muitas esquadrias, além de não possuírem vedação com laje em concreto armado na parte superior da casa. No detalhe da Figura 48 é possível identificar as aberturas existentes entre a alvenaria e os caibros do telhado, permitindo também uma ampla troca gasosa entre o meio interno e externo, dificultando o confinamento de gases no ambiente interno.

Para os cômodos dos banheiros, foram verificadas maiores médias de ^{222}Rn no ar, mas quando submetidas a análise estatística tornaram-se correlações insignificantes. Outra variável que também demonstrou médias altas foi o emboço que cobrem as alvenarias das edificações, porém, como foram encontradas apenas duas casas com essa característica, a amostra demonstrou ser insignificante podendo ser melhor avaliada em novos estudos que contenham um maior número de dados.

Na avaliação quanto a influência das águas superficiais, em nenhum dos dados obtidos houve uma correlação positiva ou negativa com o ^{222}Rn no ar, sendo a hipótese de influência nas concentrações de radônio 222 no ar com a proximidade de reservatórios, não confirmada neste estudo.

Já para o uso de água subterrânea dentro das residências, foi observada uma correlação positiva entre concentrações mais elevadas de ^{222}Rn no ar e o uso de água em atividades diárias, dentre elas a ingestão humana. Outro resultado que indica uma possível presença de ^{222}Rn nas águas subterrâneas do Seridó paraibano foi obtido através das respostas dos questionário aplicados, ao identificar que 100% dos pacientes com neoplasia estomacal ingeriam águas advindas de poços. Além desses dados, a maior incidência de câncer de estômago nessa região

informada pelo sistema do DATASUS e também confirmado nos resultados do questionário nesse estudo, indicaram um sinal de alerta, visto que o consumo com águas contaminadas por radônio 222 pode gerar essa neoplasia em humanos.

Devido ao cenário descrito neste estudo, indica-se como medida de segurança, a avaliação da existência de ^{222}Rn nas águas subterrâneas do Seridó Paraibano. Caso haja a confirmação de concentrações radioativas nocivas ao ser humano na água, devem ser realizadas medidas para redução desse elemento, já que os atuais tratamentos realizam apenas uma transferência do meio aquoso e liberação no meio gasoso, sendo um atenuante nas concentrações internas de ^{222}Rn no ar (KIM, 2023).

Para os garimpos avaliados, não foi observada nenhuma correlação significativa entre as concentrações de ^{222}Rn no ar e a extração mineral, considerando os garimpos ativos e inativos. Porém, foi possível identificar uma intensa degradação ambiental nos garimpos, sendo um trabalho manual e informal, com ausência do uso de EPI, gerando sérios riscos a saúde do trabalhador.

Por fim, evidencia-se que o consumo humano das águas subterrâneas no Seridó paraibano deve ser evitado, sendo indicado só após estudos mais aprofundados sobre a contaminação radioativa dessas águas.

7.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi identificada a presença de ^{222}Rn no ar em todas as análises realizadas no Seridó paraibano. Porém em 100% das amostras os valores estavam abaixo do máximo recomendado pela WHO de 100 Bq/m^3 . Nos dois municípios analisados, Picuí e Nova Palmeira, as concentrações de ^{222}Rn variaram de 0,00 a $31,82 \text{ Bq/m}^3$, representando aproximadamente 1/3 do valor máximo recomendado.

Foram verificados que os cômodos que faziam uso de água em seu ambiente interno, banheiro e cozinha, apresentaram maiores concentrações de ^{222}Rn no ar quando comparado aos quartos.

A dosimetria calculada para a área de estudo, foi enquadrada no nível background, sendo menor do que o limite permitido pela UNSCEAR (2000). O risco para obter câncer de pulmão no Seridó oriental paraibano devido a inalação do ^{222}Rn foi de 8,1 habitantes a cada 1 milhão de pessoas residentes no período de um ano na área, sendo abaixo da média mundial que é de 170 a 230 por milhões de pessoas, por ano. Logo, conclui-se que há um baixo risco de ocorrência de câncer de pulmão no Seridó paraibano devido a inalação do ^{222}Rn , e não foi encontrada uma correlação com o câncer de estômago e leucemia.

O uso da água em ambientes internos foi identificado como variável relevante na análise de radônio 222 em locais fechados. Com relação as fontes de água, foi observada uma correlação positiva entre o uso de águas subterrâneas e maiores concentrações de ^{222}Rn no ar, sendo um forte indicativo da presença de radônio nas águas subterrâneas de Picuí-PB e Nova Palmeira-PB. Nas demais fontes avaliadas não foram encontradas correlações com o ^{222}Rn .

A alta concentração de casos de câncer de estômago na região do Seridó oriental paraibano, pode estar relacionada aos fortes indícios da presença de ^{222}Rn na água subterrânea e a sua ingestão. Através do questionário verificou-se que os entrevistados que afirmaram ter câncer de estômago, em 100% dos casos consumiam água subterrânea, sendo mais um forte indicio da presença do ^{222}Rn na água. Não foi possível afirmar que houve uma correlação positiva, porém recomendam-se estudos mais aprofundados sobre a qualidade da água subterrânea no Seridó.

Recomenda-se também que, até que ocorram pesquisas mais detalhadas sobre uma possível contaminação radiológica nas águas subterrâneas do Seridó paraibano, o uso para ingestão humana seja evitado sempre que possível.

Não foi encontrada uma correlação entre o ^{222}Rn no ar e a proximidade com os corpos hídricos superficiais analisados neste estudo, todos os resultados obtidos não apresentaram nenhuma linearidade entre o ^{222}Rn no ar e a distância.

Nos garimpos do Seridó oriental paraibano todas as leituras radiométricas indicaram baixas concentrações de ^{222}Rn , e isso pode ser justificado por serem ambientes superficiais e ventilados, sem riscos a curto prazo para a saúde dos garimpeiros. Não houve evidências que correlacionassem o câncer de estômago com o trabalho dos garimpeiros.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros foi indicada a análise das concentrações de ^{222}Rn na água subterrânea do Seridó oriental paraibano, já que foram encontrados fortes indícios desse fato.

Caso haja a constatação da contaminação da água subterrânea por ^{222}Rn , recomenda-se estudos que proponham formas de tratar a água, visto que as fontes hídricas nessa região são escassas.

Ainda como sugestão para estudos futuros, propõe-se que sejam mapeadas áreas residenciais no entorno de cemitérios para avaliação do ^{222}Rn no ar, devido à forte presença de pedras graníticas nos túmulos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABUELHIAA E. Evaluation of annual effective dose from indoor radon concentration in Eastern Province, Dammam, Saudi Arabia. **Rad. Physics and Chem.** doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.03.004, 2017.

AESA- Agência Executiva de Gestão de Águas Paraibanas. **Bacia hidrográfica Piranhas-Açu.** Disponível em: <http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/volumesAcudes.do?metodo=preparaGraficos&codAcude=8054>. Acessado em: 28 de outubro de 2019.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas. Comitê de bacias – Bacia Hidrográfica Piranhas – Açu. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/comite-de-bacias/piranhas-acu/>. Acesso em: setembro de 2019.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas. Comitê de bacias – **Volume dos açudes.** Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/ultimos-volumes/>. Acesso em: setembro de 2023.

AIRTHINGS HOME. Radon Detector. Disponível em: <https://www.airthings.com/home>. Acesso em: junho de 2019

ALBERIGI, S.; Sobre a influencia de fatores ambientais nos niveis de radonio em cavernas dos Parques Estaduais do Vale do Ribeira, SP e avaliacao do equilibrio radioativo e fator de equilibrio entre radonio e seus descendentes. **Instituto de pesquisa energéticas nucleares**, 2011.

AMARAL P. G. Q. Avaliação da alternativa e da exalação do gás radônio em rochas ornamentais. **Tese de doutorado no Programa de Pós-graduação em arquitetura e urbanismo.** USP, São Paulo, 2016.

AMARAL D. S. ; RAMOS M. L. O. S.; FARIAS E. E. G.; SILVA K. E. M.; NETO J. A. S.; FRANÇA E. J. De da de Ingestion of well water in areas of the uraniferous phosphorit in the metropolitan region of recife, pernambuco, and associated risks. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.10, p. 101117-101124 oct. 2011.

APPLETON J. D. Radônio no ar e na água. **Revista Fundamentos da geologia médica.** Pp 239-277, 2012.

ARAÚJO M. H. M. C.; FONSÊCA D. K. O. Projeto de incentivo à reutilização de rejeitos minerais para a geração de renda para garimpeiros na região do Seridó Oriental, 2017.

AZEVEDO, Leiliane Rufina Pereira et al. Correlação entre emanção de gás radônio e porosidade de rochas ornamentais do Estado do Ceará, Brasil. **Geologia**, v. 27, n. 1, 2014.

BEURLIN, H.; MULLER, A.; SILVA, D.; SILVA, M. R. R. Petrogenetic significance of LA-ICP-MS traceelement data on quartz from the Borborema Pegmatite Province, northeast Brazil. **Mineralogical Magazine**, edição 75: 2703-2719, 2011.

- BIONDI J.C. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. São Paulo, **Oficina de Textos**, 528 p, 2003.
- BLANCO-NOVOA O.; FERNÁNDEZ-CARAMÉS T. M.; FRAGA-LAMAS P. D.; CASTEDO A. L. Cost-Effective IoT System for Monitoring Indoor Radon Gas Concentration. **Sensors**. Vol. 18.doi:10.3390/s18072198, 2018.
- BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Sumário Mineral / Coord. Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2007.
- BRASIL, **Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)**. Anuário nacional brasileiro: principais substâncias metálicas, 2016.
- BRASIL. Agência Nacional das Águas (ANA). **Alternativas organizacionais para gestão de recursos hídricos**. Brasília- DF 2013.
- BERSIMBAEV, R.; PULLIERO, A.; BULGAKOVA, O.; KUSSAINOVA, A.; ARIPOVA, A.; IZZOTTI, A. Radon Biomonitoring and microRNA in Lung Cancer. **Int. J. Mol. Sci.**, 21, 2154. <https://doi.org/10.3390/ijms21062154>, 2020.
- BOMFIM D. S.; SILVA É. V.; SANTOS E. B.; SANTOS H. S. S.; SILVA N. F. S.; MIRANDA L. N. Fatores preponderantes para o desenvolvimento do câncer de estômago. Caderno de Graduação - **Ciências Biológicas e da Saúde - UNIT – ALAGOAS**, 2020.
- BUSHONG, S. C. Manual de radiología para técnicos – Física, biología y protección radiológica. **Tradução de Diorki Servicios Integrales de Edición**. 1. ed. Madri: Mosby/Doyma Libros, 710p. Título original: Radiologic Science for Technologists, 5th edition, 1993.
- CAMERON E.N.; JAHNS R.H.; MCNAIR A.H.; PAGE L.R. Internal structure of granitic pegmatites. **Economic Geology, Monograph 2**, 1949.
- CASTRO, S. B.; HEDRICK, J. B. Rare earth elements. **Industrial Minerals and Rocks**. Colorado, 769-792, 2005.
- CERN** - European Organization for Nuclear Research. Medição em tempo real do radônio 222 atividade e radiação mista caracterização de campos com silício detector de pixel. Manual, 2019.
- ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatitic deposits. **Geoscience Canada**, 18(2): 49-67, 1991.
- CHAVES, L. C. C. *et al.*, Water mutagenic potential assessment on a semiarid aquatic ecosystem under influence of heavy metals and natural radioactivity using micronuclei test. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 23, n. 8, p. 7572–7581, 2016.
- CHENG E. S.; EGGER S.; HUGHES S.; WEBER M.; STEINBERG J.; RAHMAN B.; WORTH H.; RUANO-RAVINA A.; RAWSTORNE P.; YU X. Q. Systematic review and

meta-analysis of residential radon and lung cancer in never-smokers. **European respiratory review**, vol. 126, pág. 5, 2021.

CINELLI G.; TOLLEFSEN T.; BOSSEW P.; GRUBER V.; KONSTANTINS B.; FELICE L.; CORT M. Versão digital do Atlas Europeu de Radiação Natural. **Journal of environmental radioactivity**, vol. 196, pág. 240-252, 2019.

COSTA E. B. G.; ALVES J. J. A.; SILVA V. S. Um estudo da distribuição pluviométrica da microrregião do Seridó paraibano. **I Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro**, Campina Grande, 2017.

CPRM- **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais**/ Serviço Geológico do Brasil. Sistema de informações das águas subterrâneas- SIAGAS. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout> Acessado em: 22 de outubro de 2019.

CPRM. - **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais**/ Geologia e recursos minerais do estado da Paraíba. Acessado em: 06 de dezembro de 2019. Disponível em: file:///C:/Users/aluno/Downloads/Geologia_Paraiba.pdf., 2002.

ĆUJIĆ M.; MANDIĆ L. J.; PETROVIĆ J.; DRAGOVIĆ R.; ĐORĐEVIĆ M.; ĐOKIĆ M.; DRAGOVIĆ S. Radon-222: environmental behavior and impact to (human and non-human) biota. **International Journal of Biometeorology**, v 65, 2021.

CURADO A.; SILVA J.; CARVALHO L.; LOPES S. I. Indoor Radon concentration assessment in a set of single family houses: case study held in Barcelos, North of Portugal. **Energy Proced.** Vol. 136. Pag. 109-114. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.295, 2017.

DANTAS J. As atividades das cooperativas na atividade mineral no Seridó paraibano: os casos da COOPICUÍ e COOMIPEL. **Dissertação** no Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional- UEPB, 2017.

DANTAS J.; ANDRADE L. G.; LEITE I. R.; TEXEIRA A. L. Q. F.; GOMES R. A. A trajetória da mineração no seridó paraibano. **I Congresso Nacional da Diversidade no Semiárido (CONIDIS)**, Campina Grande, 2016.

DANTAS R. C.; NAVONI J. A.; ALENCAR F. L. S.; XAVIER L. A. C.; AMARAL V. S. Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2019.

DARBY, S., HILL, D., DEO, H., AUVINEN, A., JM, B., BAYSSON, H., BOCHICCHIO, F., FALK, R., FARCHI, S., FIGUEIRAS, A., HAKAMA, M., HEID, I., HUNTER, N., KREIENBROCK, L., KREUZER, M., LAGARDE, F., MÄKELÄINEN, I., MUIRHEAD, C., OBERAIGNER, W., PERSHAGEN, G., RUOSTEENOJA, E., SCHAFFRATH ROSARIO, A., TIRMARCHE, M., TOMÁŠEK, L., WHITLEY, E., WICHMANN, H.-E., DOLL, R. **Epidemiologic studies in Europe Residential radon and lung cancer** — detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and persons without lung cancer from 2006.

DATASUS. Incidência de neoplasias na Paraíba. **Disponível em:** <https://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude-tabnet/>. Acessado em: 15 de agosto de 2019.

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

_____; DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DO SUS - **DATASUS**. Informações de Saúde, Epidemiológicas e Morbidade: banco de dados. Acesso em: 14 out. 2019.

DOBZYŃSKI L.; FORMALSKI K. W.; RESZCZYŃSKA J. Meta-analysis of thirty-two case-control and two ecological radon studies of lung cancer. **Journal of Radiation Research**, vol. 59, 2018.

DUGGAL V.; RANI V.; MEHRA R.; SAINI K.; BAJAWA B. S. Assessment of age-dependent radiation dose and toxicity risk due to intake of uranium through the ingestion of groundwater from northern rajasthan, **India. Tox. & Envir. Chem.** doi: 10.1080/02772248.2016.1196210, 2016.

DUGGAL V.; MEHRA R.; RANI A. Analysis of radon concentration in drinking water in Hanumangarh district of Rajasthan, India. **Rad. Prot. and Envir.** Vol 36, 2019.

EIDY M.; Tishkowski K. Radon Toxicity. **National Library of Medicine**, 2021.

ELÍO J.; CROWLE Q.; SCANLON R.; HODGSON J.; ZGAGA L. Estimation of residential radon exposure and definition of Radon Priority Areas based on expected lung cancer incidence. **Environ. Intern.** 114: 69-76. doi:10.1016/j.envint.2018.02.025, 2018.

EPA-Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Final Rule. 40 CFR Parts 9, 141, and 142. Washington, 2000.

EPA-Environmental Protection Agency. Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation. First Edition. Washington, 2009.

EPA – Environmental Protection Agency. **National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule.** v.65, n; 236, 2000. Washington, D.C, 2001.

ESLAMI J.; MORTAZAVI S. M. J.; MORTAZAVI S. A. R. A Glance at the Errors of Some Studies on the Health Effects of High Background Natural Radiation Areas. **National Library of Medicine**, vol. 9, 2019.

EURATOM. **The new Euratom basic safety standards directive**, 2000.

European Commission. The new Euratom Basic Safety Standards Directive, 2001.

FARIAS C. C. R. O mapa e a trama da apropriação do subsolo na porção paraibana da Província Pegmatítica da Borborema. **Trabalho de Conclusão de Curso** apresentado à Coordenação do Curso de Geografia da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

FATHABADIAB N.; SALEHIC A. A.; NADDAFI K.; KARDAN M.; YUNESIANA R. M.; NODEHI R. N.; DEEVBAND M. R.; SHOOSHTARIF M. G. Public ingestion exposure to ²²⁶Ra in Ramsar, Iran. **Journal of Environmental Radioactivity**, vol. 198, pag. 11-17, 2019.

FETTER R.; OLIVEIRA C. H.; SAITO C. H. As Chuvas na Microrregião Geográfica do Seridó: contribuições para a seleção de áreas nos estudos de mudanças climáticas da Rede Clima. **V Encontro Nacional da Anppas, Florianópolis**, 2010.

FERREIRA, J. A. de M. Trilhas da Mineração no Seridó. Campina Grande: **SEBRAE**, p. 236, 2011.

FERREIRA V. V. M.; CHAGAS C. J.; MOREIRA R. M.; ROCHA Z.; SANTOS T. O.; FONSECA R. L. M. Investigação da atividade do Rn-222 ao longo de um pequeno córrego na Bacia Representativa de Juatuba – MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, Porto Alegre, 2018.

FIANCO, A.C.B. Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre, RS. 2011. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

FRAENKEL M O, GOUVEA V A, MACACINI J F, CARDOZO K, CARVALHO FILHO C A, LIMA C E 2008 Determination of radon and progeny concentrations in Brazilian underground mines. In: 12. **International Congress of the International Radiation Protection Association**. IRPA 12 Proceedings. Buenos Aires: 5p, 2008.

FRANCISCA, Diego Diegues. Novo método de avaliação da exposição ocupacional ao gás radônio em ambientes de mineração. 2019. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2019.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. Grupo de Trabalho em Ciência Aberta. Termo de referência: gestão e abertura de dados para pesquisa na **Fiocruz**. Rio de Janeiro, 2019.

GARCÊZ R. W. D. Concentração de atividade e mapeamento de radionuclídeos nos solos do estado do Espírito Santo. **Tese da UFRJ**, 2020.

GARSKY J.; COYLE D.; WHYTE J.. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon. **Environmental health perspectives**, vol. 126, pág. 5, 2018.

GE C. B.; KIM J.; LABRECHE F. E.; HEER C.; CANÇÃO V. H.; ARRANDALE M.; PAHWA C. E. PETERS P. ; DEMERS A. Estimating the burden of lung cancer in Canada attributed to occupational radon exposure using a novel exposure assessment method. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, 2020.

HANFI M. Y. M. Radiological evaluation of gamma and radon dose rates in ancient uranium mining tunnels in Egypt. **Ciências Ambientais da Terra**, vol. 78, 2019.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna**. Tradução de Denise Helena da Silva Sotero, Gerson Bazo Costamilan, Luciano Videira Monteiro e Ronaldo Sérgio de Biasi. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 355p. Título original: *Fundamentals of Physics*, 4th edition, Extended Version, 1995.

HEINRICH E.W. Zoning in pegmatite districts. **American Mineralogist**, 38: 68-87, 1953.

HOLLANDA, M. H. B .M.; ARCHANJO, C. J.; BATISTA, J. R.; SOUZA, L. C. Idades detritais de zircão e composições de isótopos Nd das bacias Seridó e Lavras da Mangabeira (província de Borborema, NE Brasil): Evidências de exumação e reciclagem associadas a uma grande mudança na proveniência sedimentar. **Precambrian Research**, edição 258, pág. 186- 207, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Senso 2010

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama estado da Paraíba. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/panorama>. Acessado em: 02 de novembro de 2019.

ICRP- International Commission On Radiological Protection. International commission on radiological protection, ICRP publication 65. **Oxford**: Pergamon press, 1993.

ICRP- International Commission On Radiological Protection. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, Publicación 103, 2007.

INÁCIO M.; SOARES S.; ALMEIDA P. Radon concentration assessment in water sources of public drinking of Covilhã's county, Portugal. **Jou. of Rad. Res. and App. Scie.** doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrras.2017.02.00>, 2017.

LEAL NETO, Antonio et al. Parâmetros normativos das rochas ornamentais pegmatíticas do Seridó Oriental Paraibano - Pedra Lavrada/PB. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, v. 41, n. 1, p. 41-52, 2019.

LINNEN R.L., VAN LICHTERVELDE M., ČERNÝ P. 2012. Granitic Pegmatites as Sources of Strategic Metals. **Elements**, **8**: 275-280, 2012.

LONDON, D. Geochemistry of alkali and alkaline earth elements in ore-forming granites, pegmatites and rhyolites. Rare Element Geochemistry and Mineral Deposits. **Geological Association of Canada Short Course Notes**, 17: 17-43, 2009.

LOPES, A. B. C. Avaliação das concentrações de flúor em águas subterrâneas: estudo de caso do município de Lins. **Dissertação**, UNESP, 2017.

LUBIN, J.H., WANG, Z.Y., BOICE JR., J.D., XU, Z.Y., BLOT, W.J., DE WANG, L., KLEINERMAN, R.A. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. **Int. J. Cancer**, 109, 132–137. <https://doi.org/10.1002/ijc.11683>, 2004.

KEITH L. S; FAROON O. M. **Handbook on the Toxicology of Metals**. 5ª edição, vol. II, pág. 885-936, 2022.

KERAMATI H.; GHORBANI R.; FAKHRI Y.; KHANEGHAH A. M.; CONTI G. O.; FERRANTE M.; GHADERPOORI M.; TAGHAVI M.; BANINAMEH Z.; BAY A.; GOLAKI M.; MORADI B. Radon 222 in drinking water resources of Iran: A systematic review, meta-analysis and probabilistic risk assessment (Monte Carlo simulation). **Food and Chemical Toxicology**. DOI: 10.1016/j.fct.2018.03.042, 2018.

KHAN A. J. A study of indoor radon levels in Indian dwellings influencing factors and lung cancer risks. **Radiat Meas** Vol. 32. Pag. 87-92, 2000.

KIM Y.; JANG Y.; KIM H.; SHIN H.; SINGH R.; KIM K. 222 Radon reduction in small-scale water supply systems using low-technology reduction methods in the Republic of Korea: A field research and mass balance model approach. **Science of The Total Environment**, Volume 869, 15 April 2023, 161820, 2023.

KREWSKI, D., LUBIN, J.H., ZIELINSKI, J.M., ALAVANJA, M., CATALAN, V.S., WILLIAM FIELD, R., KLOTZ, J.B., LÉTOURNEAU, E.G., LYNCH, C.F., LYON, J.L., SANDLER, D.P., SCHOENBERG, J.B., STECK, D.J., STOLWIJK, J.A., WEINBERG, C., WILCOX, H.B. A combined analysis of north American case-control studies of residential radon and lung cancer AU. J. **Toxicol. Environ. Health Part A** 69, 533–597, 2006.

MAGALHÃES, M. H.; AMARAL E. C. S. I; ACHETH I. S.; ROCHEDO E. R. R Radon-222 no Brasil: um esboço das medidas internas e externas Autor links open overlay panel. **Journal of Environmental Radioactivity**, Volume 67, Edição 2 , 2003

MARCON, A. E. *et al.*, Mutagenic potential assessment associated with human exposure to natural radioactivity. **Chemosphere**, v. 167, p. 36–43, 2017.

MARTÍNEZ Á. R.; DURÁN M. T.; BARROS-DIOS J. M.; RUANO-RAVINA A. Residential radon and small cell lung cancer. A systematic review. **Cancer Letters**.DOI: 10.1016/j.canlet.2018.04.00, 2018.

MEDEIROS N. V. S. Radioecologia efetiva para norm em municípios do sertão da Paraíba e do Rio grande do norte. **Tese** apresentada ao Programa de PósGraduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal Pernambuco, 2020.

MILAN M. O. Investigação química e radiológica de fontes de águas subterrâneas em município da Paraíba. **Dissertação** apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

MIRDORAGHI M.; EINOR D.; ASGHARI F. B.; ESRAFILI A.; HEIDARI N.; MOHAMMADI A. A.; YOUSEFI M. Assess the annual effective dose and contribute to risk of lung cancer caused by internal radon 222 in 22 regions of Tehran, Iran using geographic information system, **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, 2020.

MOREIRA F. H. S.; ALBERTI H. L. C.; TADDEI M. H. T.; SILVA

N. C.; FLEMING P. M. Estudo Comparativo de Métodos para Determinação da Concentração de Radônio-222 em fontes naturais de águas no Planalto de Poços de Caldas, **Revista águas subterrâneas Brasil**. v. 32 n. 1, 2018.

MUJALLI R. A.; Roisenberg · A.; Cordova-G.; Stefano · P. H. P. Indoor radon concentration and a diffusion model in dwellings situated in a subalkaline granitoid area, Southern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 2021.

NAKASONE S.; ISHIMINE A.; SHIROMA S.; MASUDA N.; NAKAMURA K. ; SHIROMA Y.; OOKA S.; TANAKA M.; KATO A.; HOSODA M. Temporal and Spatial Variation of Radon Concentrations in Environmental Water from Okinawa Island, Southwestern Part of Japan. **Environmental research and public health**, 2021.

NASCIMENTO, Vagner Ferreira do et al . Vulnerabilidades em saúde de garimpeiros de uma região amazônica. **Enfermería Actual de Costa Rica**, San José , n. 37, p. 30-49, Dec. 2019 .

National Center for Health Statistics, Division of Vital Statistics, Center for DiseaseControl 1930-2004, public-use data file; 2005-2007, special-use data file. Acessado em: 02 de outubro de 2010.

NCRP- Evaluation of Occupational and Environmental Exposures to Radon and Radon Daughters in the United States, NCRP REPORT. Bethesda, Md, 1984.

NOGUEIRA A. C. Groundwater quality with emphasis in radionuclide toxicity in the Uraniferous Province of Lagoa Real, Bahia State, Brazil. **DSPACE Manakin Repository**, 2021.

NOVERQUES B. A.; SANCHO B. J. M.; GARCÍA-FAYOS B.; VERDÚ G. Study of the influence of radon in water on radon levels in air in a closed location. **Radiation Physics and Chemistry**, vol. 171, 2020,a.

NOVERQUES B. A.; SANCHO B. J. M.; GARCÍA-FAYOS B.; VERDÚ G. Study of the influence of radon in water on radon levels in air in a closed location. **Radiation Physics and Chemistry**, vol. 171, 2020,b.

NURRAHIM I; APU Y. S.; HARTO A. W. Análise Fenômeno Transporte Gás Radon-222 Pada Lapisan Bumi di Kawasan Sumur Pantau Prekursor Gempa Daerah Piyungan, Bantul. Universitas Gadjah Mada, 2021.

OLIVEIRA E. M.; SELVA V. Estudo da erosão no Seridó paraibano como indicador do processo de desertificação: Juazeirinho, Paraíba (Study of erosion in Seridó paraibanoas an indicator of desertification: Juazeirinho, Paraíba). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, 2019.

OLIVEIRA, Monique Soares de. Avaliação dos níveis de concentração de radônio em águas de poços, rochas e solos em Carambeí-PR. 2021. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

OSORIO A. G.; RAVINA A. R.; LEMAS L. V.; DIOS R. M. B.; RÍOS M. Residential Radon in Central and South America: A Systematic Review. **Environmental Research and public health**, v, 17, 2020.

OTOO F.; ARHIN I.; DARKO E. Studies Of Radon Levels, Radium Concentration, And Estimated Effective Dose In Dwellings And Soils In Gold Mining Towns In Abirem Of Eastern Region Of Ghana. **Radiation Protection Dosimetry**, 2020.

PALUDO C. M. Mineralogia e geoquímica dos nif-pegmatitos da mina de pitinga (AMAZONAS-BRASIL), **Dissertação de Mestrado**, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

QUEIROZ H. A. Classificação de pegmatitos do centro-sul do estado de Tocantins: Caracterização química e mineralógica. fundação UFMG, departamento de recursos minerais programa de pós-graduação em geociências. **Dissertação de mestrado**, 2009.

RAHMAN n. m.; Chen j.; Radon exhalation from building materials for decorative use. **Journal of Enviromental Radiantion**, 2010.

RAMOS M. L. O. S. Radônio-222 a ocorrência de câncer de pulmão em municípios da região metropolitana de Recife com afloramentos de fosforito uranífero. Universidade Federal de Pernambuco. **Tese**, 2020.

REBELO, A. M. A.; BITTENCOURT, A.V.K.; MANTOVANI, L.E. **Modelos de exalação de radônio em paisagens tropicais úmidas sobre granitos**. Boletim Paranaense de Geologia. UFPR. 52, 61-76, 2003.

ROBILOTTA, C. C. A tomografia por emissão de pósitrons: uma nova modalidade na medicina nuclear brasileira. **Revista Panamericana de Salud Publica**, v. 20, n. 2/3, p. 134-142, 2006. Disponível em: Acesso em: 6 abr. 2007.

RODRÍGUEZ G. P.; GASO M. I.; ARMIENTA M. A.; TRUETA C.; MORALES I.; ALFARO R.; SEGOVIA N. Indoor radon exposure and excess of lung cancer mortality: the case of Mexico—an ecological study. **Environmental Geochemistry and Health**. volume 43, pag. 221–234, 2021.

SALES M. L.; GUIMARÃES A. V. S. Fatores de risco no desenvolvimento de câncer gástrico. **Revista Brasileira de Ciências da Vida**, v. 5 n. 1 2017.

SANTOS L. C. M. L.; GENUÍNO V. A.; SALES E. D. G.; VIEIRA F. F.; SANTOS E. J. Condicionamento estrutural e mapeamento geológico de detalhe dos pegmatitos alto do feio e alto serra branca, região de Pedra Lavrada (PB), província pegmatítica do Seridó, NE do Brasil, **Revista de Estudos Geológicos**, v.26, 2014.

SANTOS, E. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA Jr. J. M. Nota explicativa do Mapa Geológico da Paraíba. **Serviço Geológico do Brasil**, p. 234, 2000.

SANTOS, E. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA Jr. J. M. Nota explicativa do Mapa Geológico da Paraíba. **Serviço Geológico do Brasil**, p. 234, 2018.

SANTOS, E. J.; SOUZA NETO, J. A.; SILVA, M. R. R.; BEURLIN, H.; CAVALCANTI, J. A. D.; SILVA, M. G.; COSTA, A. F.; SANTOS, L. C. M. L.;

- SANTOS, R. B. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema, **CPRM** p. 343-388, 2016 **a**.
- SANTOS, R. B. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema, **CPRM** p. 343-388, 2016 **b**.
- SANTOS M. N. S. Estudo de caso na definição de modelo padrão para radioatividade ambiental na Paraíba. **Dissertação UFPE**, 2018.
- SCORZA, E. P. Província Pegmatítica da Borborema. Rio de Janeiro. **Departamento Nacional de Produção Mineral**, p. 55, 1944.
- SHU'AIBUA H. K.; KHANDAKER M. U.; BABALLE B.; TATA C.; ADAMU M. A. Determination of radon concentration in groundwater of Gadau, Bauchi State, Nigeria and estimation of effective dose. **Radiation Physics and Chemistry**, vol. 178, 2021.
- SHURGASHTI S.; RAHMANI A.; DEHDASHTI & K. MOEINIAN A. Determination of airborne Radon and its relationship with the type of residential buildings in Damghan, Iran. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2022.
- SILVA C. R.; VASCONCELOS D. Avaliação Dos níveis de radônio em ambientes fechados no Brasil: uma visão geral. **Revista Virtual de Química**, v 13, pág. 1372, 2005.
- SILVA C.R.; CALDEIRA P. P.; NANIB A. A. S. F.; SILVA-FILHO E. V. A Radon Levels in a Hospital in Niterói Municipality-RJ, Brazil. **J. Braz. Chem. Soc.**, Vol. 29, No. 12, 2580-2585, 2018.
- SILVA K. M E.; Farias E. E. G. Ingestão de águas de poços em áreas do fosforito uranífero na região metropolitana do recife, pernambuco, e riscos associados. **Brazilian Journal of development**, 2021.
- SIMMONS W.B.; WEBBER K.L. Pegmatite genesis: state of the art. **European Journal of Mineralogy**, **20**: 421-438, 2008.
- SOARES, D. R. Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. UFPE, **tese de doutorado** em geociências, Recife, 2003.
- SOHRABI M. World high background natural radiation areas: Need to protect public from radiation exposure. *Rad. Measur.* DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.03.011, 2013.
- VASCONCELOS, S. A. O uso do território do município de Pedra Lavrada PB pela mineração: elementos de inserção do lugar do fazer no contexto atual da globalização. 216 pág. 2006. **Tese de Doutorado** – UFPE – Recife PE, 2013.
- SOMLAI, J.; GORJÁNÁ CZ, Z.; VÁRHEGYI, A.; KOVÁCS, T. Radon concentration in houses over a closed Hungarian uranium mine. **Sci. Tot. Environ.** **367**, 653e665, 2006.
- SOUSA P. D. R. APRENDIZAGEM NUMA PERSPECTIVA CTSA NA INTERAÇÃO QUÍMICA ENTRE POLUENTES DE INTERIORES. **Congresso nacional de pesquisa e ensino científico**, 2020.

STEFANO P. H. P.; ROISENBERG A. Presença de Radônio no Ar de Edificações da Área Abrangida pelo Granito Viamão em Porto Alegre, Brasil, Utilizando Detectores Tipo CR39. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 42 - 3 / 2019.

SURESH S; RANGASWAMY D. R.; SRINIVASA E.; SANNAPPA J. A. Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, vol. 13, pág. 12-16, 2021.

SZABÓ K. Z.; GYOZO J.; ÁKOS H.; SZABÓ C. Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary. **Journal of Environmental Radioactivity**, Vol. 129, Pages 107-120, 2014.

SYURYAVIN A. C.; PARK S.; NIRWONO M. M.; LEE S. H. Indoor radon and thoron from building materials: Analysis of humidity, air exchange rate, and dose assessment, **Nuclear Engineering and Technology**, 2020.

THABAYNEH K. M. Measurement of ^{222}Rn concentration levels in drinking water and the Associated health Effects in the southern part of west bank-Palestine. **Appl. Rad. and Isot.** doi: 10.1016/j.apradiso.2015.05.007, 2015.

TENE T.; VACACEL C. G.; USCA G. T.; SUQUILLO B.; BELLUCCIE S. Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of Highland Region of Ecuador. **Construction and Building Materials**, vol. 293, 2021.

TORRES J. L. L. Geoquímica de micas e turmalinas de pegmatitos do distrito pegmatítico de Conselheiro Pena – MG: implicações para gênese e evolução de pegmatitos. **Dissertação de mestrado**, 2018.

THU H. N. P.; THANG N. V.; HONG T. T.; DONGCL N. V.; HAO C. Radioatividade natural e coeficiente de emissão de radônio no solo da região de Ninh Son, Vietnã. **Applied geochemistry**, vol. 104, pág. 176-183, 2019.

VAN S.; NEVES W.R.; BRITO, B. B.; WILLIAMS, I. S.; HACKSPACHER, P. C. O grupo Seridó do NE Brasil, uma bacia neoproterozóica pré-sin-colisional tardia no oeste de Gondwana: informações sobre as idades de zircão detrítico SHRIMP U-Pb e idades de residência crustal Sm-Nd (T DM), **Precambrian Research**, v. 127, n. 4, p. 287- 327, 2003.

VERDE G. L.; ARTIOLA V.; COMMARA M. L.; D'AVINO V.; ANGRISANI L.; SABATINO G.; PUGLIESE M. G.; COVID-19 and the Additional Radiological Risk during the Lockdown Period in the Province of Naples City (South Italy). **Life**, 2022.

VICTORINO P. M. L. Espectrometria gama de alta resolução aplicada na análise de radioatividade em águas devido os isótopos naturais de rádio. **Dissertação UNIESP**, 2020.

VIENNEAU D.; HOUGH K.; HAURI D.; VICEDO-CABRERA A. M.;SCHINDLER

C.; HUSS A.; RÖÖSLI M. Effects of Radon and UV Exposure on Skin Cancer Mortality in Switzerland. **Environmental Health Perspectives**. <https://doi.org/10.1289/EHP825>, 2017.

VOGELTANZ-HOLM N.; SCHWARTZ G. G. Radon and lung cancer: What does the public really know?, **Jour. of Envir. Rad.** DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.017>, 2018.

ULLAH F.; MUHAMMAD S.; ALI W. Radon concentration and potential risks assessment through hot springs water consumption in the Gilgit and Chitral, Northern Pakistan. **Chemosphere**, 2022.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly, 2008.

UNSCEAR. (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation. New York, USA: United Nations Publication.

UNSCEAR- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008). Sources and effects of ionizing radiation. Vol. I. New York.

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

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation; UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes; United Nations Publications: New York, NY, USA, 2000.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis**. Washington, Federal Register 64, pp. 9559- 9599, 2000.

ZHOU Q.; LIU S.; XU L.; ZHANG H.; XIAO D.; DENG J.; PAN Z. Estimation of radon release rate for an underground uranium mine ventilation shaft in China and radon distribution characteristics. **Journal of Environmental Radioactivity**, vol. 198, Pag. 18-26, 2019.

WEYNE G. R. S. Determinação do tamanho da amostra em pesquisas experimentais na área de saúde. **Revista. Arq. Med. ABC**, v. 29 n 87 o 2 Jul/Dez 2004.

WHO- World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, 2001.

WHO- World Health Organization. Survey On Radon Guidelines, Programmes And Activities. Geneva, 2007.

WHO-World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva, 2009

YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. Radiação ionizante: dosimetria de populações. 2003. **Tese (Livre Docência em Física Nuclear)** - Instituto de Física, University of São Paulo, São Paulo, 2003. doi:10.11606/T.43.2014.tde-27012014-171929. Acesso em: 2019-12-06.

APÊNDICE A

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E GESTÃO DE
RECURSOS NATURAIS**

**QUESTIONÁRIO DE INVESTIGAÇÃO SOBRE O RISCO DE
CONTAMINAÇÃO POR RADÔNIO 222**

Esse questionário faz parte de uma pesquisa em andamento a qual possui como objetivo geral, avaliar os riscos associados à saúde da população, caso haja contaminação do ar por radônio 222. Porém, vale salientar, que esta etapa é de AVALIAÇÃO e não há até o momento da aplicação deste questionário a confirmação de nenhuma contaminação no meio analisado.

1) DADOS GERAIS DO PARTICIPANTE

Nº de identificação:	
Cidade:	
Endereço do entrevistado:	
Idade:	
Sexo:	<input type="checkbox"/> Masculino <input type="checkbox"/> Feminino

**2) INVESTIGAÇÃO DE POSSÍVEIS FATORES DE INFLUÊNCIA NO
RADÔNIO 222 NO AR**

1. Tempo que reside nesta residência:	
2. Atualmente, qual fonte de água é utilizada em sua residência:	<input type="checkbox"/> Carro pipa <input type="checkbox"/> Poço <input type="checkbox"/> Água da chuva
3. <i>OBS: Podem ser marcadas mais de uma alternativa neste item.</i>	<input type="checkbox"/> Rede de abastecimento de água <input type="checkbox"/> Água Mineral <input type="checkbox"/> Outros: _____
4. Em geral, na sua residência, as paredes são revestidas com?	<input type="checkbox"/> Tijolo exposto <input type="checkbox"/> Reboco <input type="checkbox"/> Reboco e Pintura
Qual a sua atividade profissional atual?	

5. Já trabalhou em algum ambiente que gerasse riscos de danos à sua saúde, como químicos ou radiológicos?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não Caso sim, quais: _____
6. Atualmente possui alguma doença cancerígena?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
7. Em caso positivo, especifique o câncer.	<input type="checkbox"/> Estômago <input type="checkbox"/> Pulmão <input type="checkbox"/> Leucemia <input type="checkbox"/> Outros: _____
8. Fuma ou já fumou em algum período da vida?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
Em sua moradia existe algum fumante?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
9. Possui ou possuiu alguma doença como:	<input type="checkbox"/> Pólipos estomacais <input type="checkbox"/> Gastrites <input type="checkbox"/> Úlceras estomacais
10. Na sua família já houve algum caso de câncer de pulmão, estômago ou leucemia?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> não sei informar Se sim, Qual? _____
11. Trabalha ou trabalhou em garimpo ou na extração de minério?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
12. Qual o garimpo ou mineradora que trabalha/trabalhou?	
13. Qual a técnica de extração utilizada no garimpo?	<input type="checkbox"/> Manual <input type="checkbox"/> Mecanizada
14. Como é/era a extração? OBS: Podem ser marcadas mais de uma alternativa neste item.	<input type="checkbox"/> Superficial <input type="checkbox"/> Subterrânea
15. Durante jornada de trabalho, utiliza/utilizava algum EPI – Equipamento de proteção individual?	

Em caso positivo, especifique.	
16. Em média, quantas horas trabalha/trabalhava por dia?	<input type="checkbox"/> 4 horas <input type="checkbox"/> 6 horas <input type="checkbox"/> 8 horas <input type="checkbox"/> 10 horas <input type="checkbox"/> 12 horas
17. Obteve algum desconforto físico respiratório durante o período que trabalha/trabalhou no garimpo?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
18. Obteve algum desconforto estomacal durante o período que trabalha/trabalhou no garimpo?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não

Obrigada, sua participação é muito importante para nós!!