

# 18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

## QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES INTERNOS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DETECTORES ALPHATRACK PARA MONITORAMENTO DE GÁS RADÔNIO NA UPV, EM VALÊNCIA, ESPANHA

Laura C. TAKAHASHI<sup>1</sup>; Aina N. MEDINA <sup>2</sup>; Belén J.J. VIDAL<sup>3</sup>; Júlia B. SEVERO<sup>4</sup>;

Isabela N. S. FERREIRA<sup>5</sup>; Ricardo G. PASSOS<sup>6</sup>

**Resumo** – A qualidade do ar em ambientes internos tem sido objeto de crescente preocupação, especialmente quanto à presença do gás radônio, um poluente radioativo natural associado ao risco de câncer de pulmão. Dentre as formas de determinação da concentração desse gás nos ambientes, destacam-se a detecção por métodos ativos e passivos. O presente estudo apresenta uma análise comparativa entre detectores passivos do tipo *Alphatrack* comumente utilizados na Espanha (Universidade Politécnica de Valência/Espanha - ISIRYM/UPV) e no Brasil (Laboratório de Radioatividade Natural - LRN/CDTN), com o intuito de avaliar a consistência dos dados obtidos e a confiabilidade dos métodos. Detectores de ambas as instituições foram expostos em cinco ambientes distintos da UPV por 104 dias. Os resultados apontam que nenhum dos pontos medidos ultrapassou o limite de intervenção de 300 Bq/m<sup>3</sup> recomendado pela OMS, sendo o valor mais alto registrado no *bunker* – instalação situada no subsolo do laboratório que apresenta condições de reduzida circulação de ar – (100,5 Bq/m<sup>3</sup>). As diferenças percentuais entre os detectores da UPV em um mesmo local variaram de 32,9% a 59,3%, indicando alta variabilidade nas medições. Já a comparação entre a média dos valores da UPV e os do LRN/CDTN apresentou diferenças que variaram de 1,7% (escritório) a 51,9% (contêiner). A análise evidencia uma alta variabilidade nas réplicas obtidas pelo método da UPV, o que levanta questionamentos sobre sua consistência quando utilizados isoladamente. A comparação dos resultados reforça a necessidade de padronização e validação cruzada entre diferentes técnicas em estudos ambientais.

**Abstract** – Indoor air quality has become a growing concern, particularly regarding the presence of radon gas, a naturally occurring radioactive pollutant associated with an increased risk of lung cancer. Among the methods used to determine radon concentration in indoor environments, active and passive detection techniques stand out. This study presents a comparative analysis of passive Alphatrack detectors commonly used in Spain (Polytechnic University of Valencia/Spain – ISIRYM/UPV) and in Brazil (Natural Radioactivity Laboratory – LRN/CDTN), aiming to evaluate the consistency of the data obtained and the reliability of the methods. Detectors from both institutions were exposed in five different environments at the UPV for 104 days. The results show that none of the measured locations exceeded the WHO-recommended intervention limit of 300 Bq/m<sup>3</sup>, with the highest value recorded in the bunker – a facility located in the laboratory basement with limited air circulation – at 100.5 Bq/m<sup>3</sup>. The percentage differences among UPV detectors at the same location ranged from 32.9% to 59.3%, indicating high variability in the measurements. In contrast, the comparison between the average values obtained by UPV and LRN/CDTN detectors showed differences ranging from 1.7% (office) to 51.9% (container). The analysis reveals high variability in the results obtained by the UPV method, raising questions about its consistency when used in isolation. The comparison of results highlights the need for standardization and cross-validation among different techniques in environmental studies.

**Palavras-Chave** – Radônio; detectores, qualidade do ar, monitoramento

<sup>1</sup> Tecn. em Radiol., MSc, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439-9623, [laura.takahashi@cdtn.br](mailto:laura.takahashi@cdtn.br)

<sup>2</sup> Eng., PhD, Universidade Politécnica de Valência, [ainome@iqn.upv.es](mailto:ainome@iqn.upv.es)

<sup>3</sup> Eng., PhD, Universidade Politécnica de Valência, [bjuste@upv.es](mailto:bjuste@upv.es)

<sup>4</sup> Eng., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439- 9623, [julia.severo@cdtn.br](mailto:julia.severo@cdtn.br)

<sup>5</sup> Eng., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439- 9623, [isabela.ferreira@cdtn.br](mailto:isabela.ferreira@cdtn.br)

<sup>6</sup> Eng., PhD, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439-9623, [ricardo.passos@cdtn.br](mailto:ricardo.passos@cdtn.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a preocupação com a qualidade do ar, tanto em ambientes internos quanto externos, tem ganhado destaque em todo o mundo. Pesquisas indicam que a concentração de poluentes em ambientes fechados pode ser de duas a cinco vezes — chegando até a cem vezes — maior que no ar externo, devido ao confinamento e à menor dispersão dos poluentes nesses espaços (ALA, 2024; CARMO & PRADO, 1999). Estima-se que, mesmo em cidades industrializadas, ambientes internos representam uma das principais fontes de exposição a contaminantes, já que as pessoas passam, em média, 90% do tempo nesses ambientes, sendo a maior parte desse tempo dentro de casa (ALA, 2024; RAJU, 2021; SCHIRMER, 2011). De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), mais da metade dos ambientes fechados — incluindo residências, escolas, hospitais e locais de trabalho — apresenta má qualidade do ar, geralmente relacionada à falta de higienização dos sistemas de climatização e à ausência de controle sobre possíveis fontes de contaminação (SCHIRMER, 2011).

Dentre os principais poluentes de ambientes internos estão os formaldeídos, asbestos, produtos da combustão e os radionuclídeos (CARMO & PRADO, 1999). No contexto dos radionuclídeos naturais, destaca-se o gás radônio, produto do decaimento radioativo de elementos como urânio-238, tório-232 e urânio-235. Seus isótopos mais comuns são o  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  e  $^{219}\text{Rn}$ , sendo o primeiro o mais relevante do ponto de vista ambiental e de saúde pública, por sua meia-vida mais longa (3,82 dias), que permite sua migração do solo para a atmosfera (UNSCEAR, 2006; HOFMANN, 2012). O radônio é um gás nobre, radioativo, incolor, inodoro e insípido, conhecido por sua alta densidade e solubilidade relativa em solventes orgânicos (PETTA & CAMPOS, 2013). Sua presença em ambientes internos é fortemente influenciada pela composição geológica do solo, pelos materiais de construção utilizados e por fatores climáticos, como temperatura, umidade e pressão (VERDELOCCO et al., 2001; NEVES et al., 2004).

Devido ao seu potencial carcinogênico — sendo apontado como a segunda principal causa de câncer de pulmão, atrás apenas do tabagismo — a OMS recomenda que a concentração média anual de radônio em ambientes internos não ultrapasse  $100 \text{ Bq/m}^3$ , com um limite máximo de  $300 \text{ Bq/m}^3$  (OMS, 2009). Em locais onde essa concentração é excedida, são indicadas medidas corretivas, como a melhoria da ventilação e vedação de fissuras estruturais. Embora alguns países já contem com políticas públicas bem estabelecidas para o monitoramento e controle do radônio, como os Estados Unidos e nações europeias (EPA US, 1988), o Brasil ainda carece de regulamentações específicas. No entanto, diversas pesquisas vêm sendo realizadas no país para mapear regiões de risco e estabelecer diretrizes para ambientes internos e ocupacionais (TAKAHASHI, 2023; CÂMARA, 2021; ANTONIZAZZI, 2013; SANTOS, 2010). A preocupação com a presença do radônio também se estende a ambientes subterrâneos, como minas, cavernas e grutas. Estudos demonstram que a atividade de mineração libera quantidades significativas de radionuclídeos, incluindo o radônio e sua progênie, tornando essencial o monitoramento desses espaços para proteção dos trabalhadores (SANTOS, 2015; SILVA, 2021).

Os detectores passivos do tipo *Alphatrack* destacam-se como ferramentas eficazes para a medição de longo prazo das concentrações de radônio em ambientes internos. Esses dispositivos registram partículas alfa por meio de danos em polímeros, permitindo a quantificação indireta do gás com precisão, sensibilidade e baixo custo operacional (MIRANDA, 2009). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo comparar a tecnologia dos detectores *Alphatrack* utilizados no *Institute of Industrial, Radiophysical and Environmental Safety* (ISIRYM) da Universitat Politècnica de València (UPV), na Espanha, com os detectores empregados no Laboratório de Radioatividade Natural (LRN) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), no Brasil. A partir dessa comparação, busca-se verificar a consistência interna dos resultados obtidos com o método aplicado na UPV, bem como avaliar possíveis discrepâncias entre os dois sistemas quando utilizados em um mesmo ponto de medição. A justificativa para esta análise está na necessidade de garantir a confiabilidade dos dados obtidos por ambas as tecnologias, contribuindo diretamente para o monitoramento preciso da qualidade do ar em ambientes internos. Além disso, os resultados deste estudo poderão fundamentar a adoção e implementação desses sistemas de medição em áreas de risco, como regiões de mineração, indústrias civis, siderúrgicas e outros setores sensíveis à exposição ao gás radônio.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

A Comunidade Valenciana é uma região autônoma situada no leste da Espanha, à beira do Mar Mediterrâneo, e é composta por três províncias: Valência, Alicante e Castellón. Geograficamente e geologicamente, ela apresenta uma diversidade de características naturais, que vão desde planícies litorâneas até cadeias montanhosas. A Comunidade Valenciana possui uma extensa linha de costa banhada pelo Mar Mediterrâneo, que influencia seu clima e ecossistemas. A geologia da região onde se localiza a Universidade Politécnica de Valência (UPV) é formada predominantemente por glaciais que são formações geológicas que se transformam em planaltos e que podem ser entalhados em encostas e por albuferas e marismas que são zonas com litorais úmidos formados pela acumulação de sedimentos. O mapa geológico da Comunidade Valenciana, assim como a localização da UPV está apresentada na Figura 1.

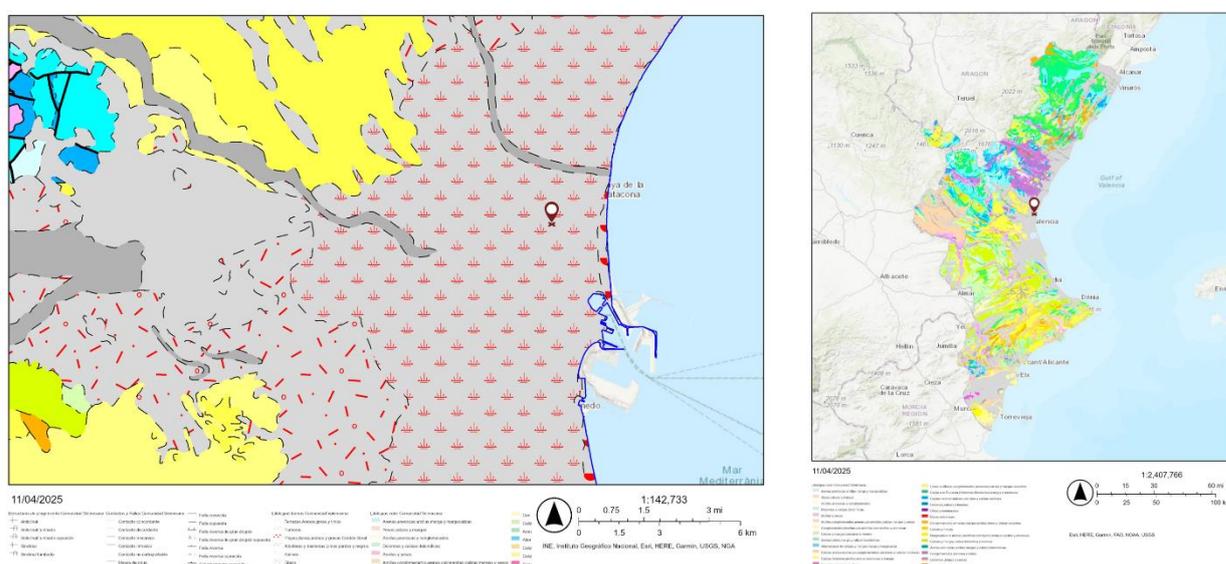


Figura 1: Mapa geológico da Comunidade Valenciana (escala 1:400.000).

No contexto do radônio, a geologia da região da UPV, marcada pela presença de glaciais e zonas úmidas como albuferas e marismas, pode influenciar diretamente a emissão de gás radônio para os ambientes internos. Os glaciais, por sua natureza sedimentar e permeável, favorecem a migração do radônio a partir de camadas mais profundas, especialmente se houver presença de minerais uraníferos nos sedimentos. Já as zonas alagadiças podem atuar como barreiras temporárias à liberação do gás, retendo-o no solo saturado.

### 2.2. Exposição dos detectores *AlphaTrack*

Os detectores do tipo CR-39 / Baryotrak do LRN/CDTN foram devidamente transportados para o laboratório ISIRYM. Enquanto os detectores Radosys já se encontravam disponíveis no local. Posteriormente, os pontos a serem expostos foram definidos de forma que houvesse uma diversidade dos locais escolhidos.

Os cinco ambientes internos estudados estavam distribuídos em três edificações da UPV. O “bunker” e o “Laboratório B” são situados no mesmo edifício, construído com materiais

convencionais, como tijolo e cimento, e com atividades destinadas a aulas e escritórios. Ressalta-se que o “*bunker*” fica localizado abaixo do solo, e atualmente não abriga nenhuma atividade em execução. Outro local de estudo foi o “contêiner” que, por sua vez, encontra-se fora de qualquer edifício e é composto por materiais como aço, alumínio, fibra e plástico. Sua principal função é armazenar amostras de materiais de construção e equipamentos simples utilizados no laboratório. Já o “Laboratório A” e o “Escritório” estão situados em um edifício térreo isolado de demais construções, totalmente apoiado no solo, com um corredor central que interliga 10 cômodos — cinco de cada lado — utilizados como laboratórios, escritórios e sanitários. Enfatiza-se que a maior parte do tempo as janelas desse edifício permanecem fechadas e o ambiente tem climatização artificial. Fotos dos locais juntamente com os detectores *Alphatrack*, podem ser vistos na Figura 2.



Bunker

Contêiner

Laboratório A

Laboratório B

Escritório

Figura 2: Locais em que foi medido a concentração de radônio dentro da UPV/Espanha.

Em cada ponto foram instalados detectores de traços da Baryotrak e da Radosys, os quais ficaram expostos em condições ambientes por 104 dias. Após esse período, cada detector passou pelo seu processo químico e analítico para a obtenção da concentração de radônio.

### 2.3. Leitura e análise dos dados

Os métodos utilizados para determinação da concentração de gás radônio nos ambientes estudados estão descritos resumidamente na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos métodos-padrão dos detectores *Alphatrack* tipo Baryotrak e Radosys.

Procedimento	Baryotrak / LRN	Radosys / ISIRYM
Solução corrosiva	500 ml de água destilada para 125 g de NaOH	4 L de água destilada para 1 kg de NaOH
Temperatura da água	75° C	90° C
Tempo de revelação	14 horas	5 horas
Lavagem dos detectores	Água corrente e água destilada	Ácido acético com água destilada; 30° C por 20 minutos
Aquisição das imagens e contagens dos traços alfa	Sistema semi-automático	Sistema automático
Conversão do número de traços para concentração do radônio	Fator de conversão calibrado pelo LRN/CDTN.	Fator de conversão disponibilizado pelo fabricante/ Radosys.

### 2.4. Cálculo de diferenças percentuais dos resultados

Para a análise da diferença dos percentuais dos resultados foi calculado a diferença entre os valores dos detectores da UPV (*intra-sítio*) e a diferença percentual entre a média da UPV e o valor de LRN (*intermétodo*). Em ambos os cálculos se utilizou a equação 1:

$$Diferença (\%) = \frac{|V_1 - V_2|}{\frac{V_1 + V_2}{2}} \times 100$$

Onde,  $V_1$  e  $V_2$  são os valores das duas medições realizadas no mesmo local. Sendo que, para os valores comparativos entre os detectores da UPV, a média entre os dois valores foi usada como referência (denominador), permitindo uma avaliação relativa da discrepância entre eles.

Para comparar os resultados obtidos pelo método UPV com o valor final LRN em cada local, calculou-se a diferença percentual entre a média dos valores de UPV (quando houve mais de um) e o valor único do LRN.

### 3. RESULTADOS

Ao se tratar da qualidade do ar, os valores recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) devem ser considerados, o qual é de 100 Bq/m<sup>3</sup> (valor de atenção) e 300 Bq/m<sup>3</sup> (valor de intervenção). Nenhum dos pontos medidos no presente estudo ultrapassou 300 Bq/m<sup>3</sup>, o maior valor medido foi de 100,5 Bq/m<sup>3</sup>, registrado no bunker (local mais esperado com possível alta concentração). Os valores apresentados sugerem que, independentemente do material de construção, da rotina de cada local e da climatização artificial dos ambientes, a concentração de radônio permanece dentro dos limites recomendados pela OMS. A Figura 2 apresenta o gráfico com a concentração de radônio nos diferentes detectores.

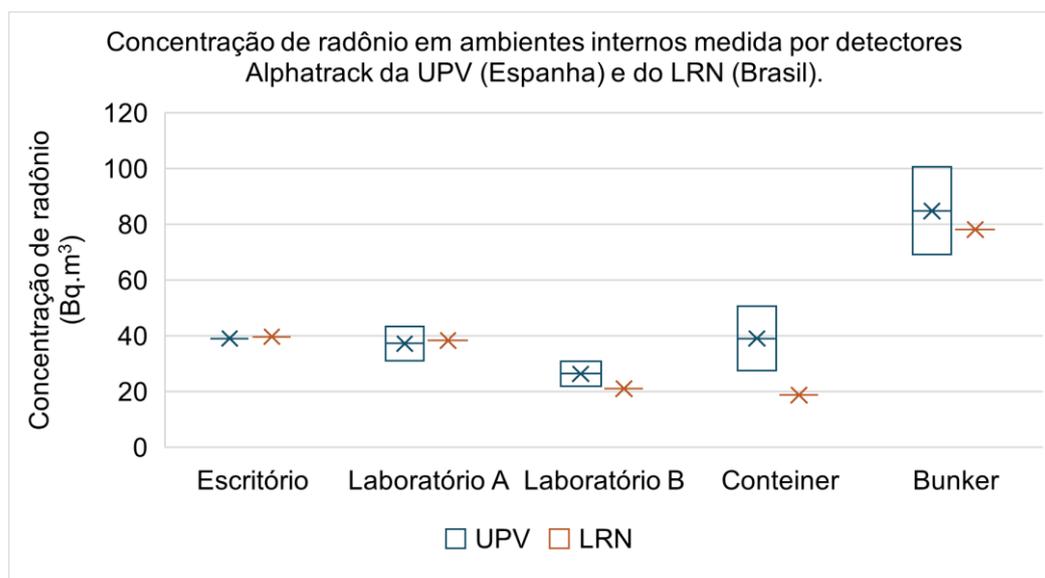


Figura 3: Gráfico da concentração de radônio em ambientes internos medida por detectores *Alphatrack* da UPV e do LRN.

A diferença entre os valores da concentração de radônio obtidas pelos detectores da UPV e do LRN estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado da diferença percentual entre os detectores estudados.

Sítio	Diferença entre os detectores da UPV (%)	Diferença entre a média UPV e LRN (%)
<b>Escritório</b>	-	1,67%
<b>Laboratório A</b>	32,89%	2,97%
<b>Laboratório B</b>	33,55%	20,34%
<b>Contêiner</b>	59,33%	51,95%
<b>Bunker</b>	37,08%	7,91%

A análise das diferenças percentuais entre os valores obtidos pelo método UPV em cada sítio revela uma variação significativa entre as medições realizadas em um mesmo ponto. Em todos os locais onde foram feitas duas medições UPV, a diferença percentual foi superior a 30%. A maior discrepância foi observada no contêiner, com uma variação de 58,4%, seguida pelo Bunker (38,6%), Laboratório B (34,1%) e Laboratório A (33,4%). Esses resultados indicam uma considerável instabilidade nas medições do método UPV, o que pode estar associado a fatores como

variabilidade nas condições ambientais, posicionamento dos detectores, características físicas do ambiente ou mesmo limitações metodológicas do procedimento adotado.

Ao comparar os valores médios do método UPV com os resultados obtidos pelo método LRN, observamos comportamentos distintos entre os diferentes sítios. No escritório e no Laboratório A, a diferença percentual entre os métodos foi baixa, com valores de 1,66% e 2,96%, respectivamente, indicando boa concordância entre as técnicas aplicadas. O bunker apresentou uma diferença moderada de 7,9%, ainda dentro de uma faixa considerada aceitável. Por outro lado, no Laboratório B (20,4%) e especialmente no contêiner (51,9%), as diferenças foram expressivas, evidenciando uma possível divergência entre os métodos ou indicando que um dos valores pode estar fora da faixa esperada devido a interferências ou erros pontuais na medição. Apesar das variações observadas, é possível verificar que ambos os métodos permitiram a identificação do mesmo padrão de comportamento do radônio nos locais estudados (locais com maiores ou menores concentrações).

#### 4. CONCLUSÕES

Para assegurar a qualidade do ar em ambientes internos, é fundamental realizar um monitoramento abrangente, que inclua a identificação de radionuclídeos presentes no ar, com destaque para o gás radônio. A intercomparação entre detectores destinados à mesma finalidade, porém baseados em metodologias distintas, mostrou-se essencial para a verificação dos dados obtidos e das abordagens adotadas por diferentes instituições de pesquisa. Considerando que o método LRN forneceu um único valor por sítio, a utilização da média dos valores obtidos por UPV como referência para o cálculo da diferença percentual foi apropriada, por representar o comportamento médio das medições realizadas com esse método e permitir uma comparação mais equilibrada entre as técnicas.

De forma geral, os resultados evidenciaram uma variabilidade significativa nas réplicas obtidas pelo método UPV, o que pode comprometer sua confiabilidade quando utilizado isoladamente. A comparação com os dados do LRN reforça a importância da utilização de métodos complementares para a validação dos resultados, especialmente em estudos voltados para a saúde ambiental. Esses achados destacam também a necessidade de padronização nos procedimentos de coleta e análise, além de apontarem para a importância da realização de estudos adicionais que permitam investigar as causas das variações observadas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, ao laboratório Institute of Industrial, Radiophysical and Environmental Safety (ISIRYM) da Universitat Politècnica de València (UPV), à CNEN/MCTI à FAPEMIG e ao CDTN/CNEN.

#### REFERÊNCIAS

ALA – American Lung Association. (2024) “*Indoor Air Quality*”. Disponível em <https://www.lung.org/clean-air/indoor-air>. Acesso em: 17 abr. 2025.

CARMO, A. T.; PRADO, R. T. A. (1999) “*Qualidade do Ar Interno*”. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

RAJU, S. et al. (2021) “*Indoor air pollution and health: A systematic review of epidemiological*

- studies*". Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7665158/pdf/nihms-1634935.pdf>. Acesso em: 21 de fev. 2025.
- SCHIRMER, J. "Indoor air pollution and public health concerns: A review of current literature". *Ciência & Saúde Coletiva*, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/rXgTKw65sVBPTbfLjdsYYyQ/>. Acesso em: 21 fev. 2025.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2006) "Effects of Ionizing Radiation".
- HOFMANN, W. et al. (2012) "Characteristics and behavior of radon and radon progeny" in *Journal of the ICRU, Report 88*, Oxford University Press, nº 2, vol 12.
- PETTA, R. A.; CAMPOS, T. N. (2013) *O Gás Radônio e sua Influência na Saúde Pública*. *Revista de Geologia*, nº , Vol 26, p. 7-18.
- VERDELOCCO, S. et al. (2001) "Radon-222 Monitoring in the Joint Research Centre – ISPRA". *The Science of the total environmental*, p. 367-368..
- NEVES, L. F.; PEREIRA, A. C. (2004) Radioatividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. *Geonovas*, nº 18, p. 103-114.
- OMS – Organização Mundial da Saúde. (2009) *Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*.
- EPA US – United States Environmental Protection Agency. (1988) *A Citizen's Guide to Radon*.
- TAKAHASHI L.C., et al., (2023) "Radiometric study in indoor environments: radon and gamma monitoring". *Book of abstracts: 4th International Conference on Dosimetry and its Applications*, Vol. 1, p. 244.
- CÂMARA, P. M. et al. "Radônio e a Alta Incidência de Neoplasias na Cidade de Lucrécia/RN". (2021) In: *Congresso Brasileiro de Epidemiologia* Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25392995/> Acesso em: 21 fev. 2025.
- ANTONIAZZI, B. N. et al. (2013) *Projeto Planalto Poços de Caldas. Pesquisa Câncer e Radiação Natural-Incidência e Comportamento de Risco*. Secretaria de Estado de Minas Gerais.
- SANTOS, T. O. (2010) *Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH*. Dissertação de mestrado em Ciência e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SANTOS, T. O. *Radionuclídeos Naturais em Minas Subterrâneas Brasileiras* (2015). Tese (Doutorado em Ciência e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SILVA, N. V. M. *Análise comparativa da concentração do gás radônio e das suas doses resultantes em cavernas de litologias carbonáticas quartzíticas e ferruginosas, localizadas no quadrilátero ferrífero-aquífero e em seu entrono regional*. (2020). Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia das radiações dos minerais e materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Belo Horizonte.
- MIRANDA, V. F. E. (2009) *Estudo dos Níveis da Emissão de 222Rn Presentes nos Materiais Radioativos de Ocorrência Natural – NORM*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Nuclear, Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.