



## INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA EM ESTUDOS DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NO AR

Isabela N. S. Ferreira<sup>1,2</sup>, Júlia B. Severo<sup>1,2</sup>, Laura C. Takahashi<sup>1</sup>, Ricardo G. Passos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN. Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Campus UFMG, Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET MG. Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil.  
belanicomedes@gmail.com

**Palavras-Chave:** Radônio, Ambientes internos, Clima, Radiação natural.

### RESUMO

A radioatividade natural varia entre regiões geográficas. Altos níveis de radiação ocorrem devido a fatores como altitude e geologia local. Em relação ao impacto radiológico, os elementos naturais mais importantes são urânio, tório e seus produtos de decaimento, como o radônio. O radônio é um gás radioativo, e suas concentrações em ambientes fechados diferem entre países e épocas do ano. No interior de construções, o radônio tende a acumular-se, podendo ser uma fonte significativa de exposição pública à radiação natural. Este estudo tem como objetivo apresentar resultados da investigação a respeito da influência da variação climática em medidas e concentrações de radônio no ar, em residências da cidade de Belo Horizonte (MG). A metodologia utilizada foi caracterização meteorológica da região, com levantamento e análise de dados do INMET, e sua correlação com resultados da concentração de radônio obtidos nos locais participantes da “Campanha de Monitoração de Radônio em Ambientes Internos de Belo Horizonte” (CMRAI-BH), que utilizou como técnica o detector de traços tipo CR-39. Os resultados da CMRAI-BH mostraram maiores concentrações durante o período seco, onde o valor máximo observado foi de 1186,03 Bq/m<sup>3</sup>, em contraste com o período chuvoso que obteve 983,33 Bq/m<sup>3</sup> como concentração máxima. Durante o período chuvoso no Brasil, as residências tendem a ficar mais tempo fechadas, porém nos momentos sem chuva os ambientes permanecem abertos devido ao calor e à necessidade de reduzir a umidade. Isso sugere que a temperatura não só influencia a exalação do radônio, mas também os comportamentos das pessoas (que terá relação com ações que podem mitigar ou favorecer o acúmulo do gás). Assim, é crucial estudar o radônio em diferentes climas para desenvolver medidas de mitigação eficazes, considerando as particularidades de cada região.

### 1. INTRODUÇÃO

A radioatividade natural varia entre regiões, e altos níveis de radiação ocorrem devido a vários fatores, como altitude e geologia local [1]. Em relação ao impacto radiológico, os elementos naturais mais importantes são o urânio, o tório e seus produtos de decaimento, também chamados de radionuclídeos secundários, como o radônio [2], que é um gás nobre radioativo. O radônio possui três isótopos: <sup>222</sup>Rn (tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) = 3,83 d), pertencente à série de decaimento radioativo do <sup>238</sup>U; <sup>219</sup>Rn ( $t_{1/2}$  = 3,92 s), proveniente do <sup>235</sup>U; e <sup>220</sup>Rn ( $t_{1/2}$  = 54,5 s), derivado do decaimento do <sup>232</sup>Th [3].

Há relação inversa entre a temperatura e o radônio, influenciada pelas variações nas condições meteorológicas, de acordo com Santos (2010). Essas mudanças afetam a taxa de exalação de radônio do solo, que é considerado a principal fonte desse gás na atmosfera e em ambientes internos. Geralmente, temperaturas mais baixas durante a manhã promovem uma estabilidade atmosférica, limitando a mistura vertical e resultando em concentrações mais altas de radônio nesse período do dia. Por outro lado, à tarde, a radiação solar aquece o solo e reduz a



pressão atmosférica, aumentando a mistura vertical e levando a uma diminuição na concentração de radônio [2]. Além disso, em muitas regiões de clima tropical, níveis reduzidos de concentração de radônio são predominantemente observados durante o verão, marcado por chuvas abundantes e altas temperaturas, ao contrário do inverno, que se caracteriza por temperaturas mais baixas e escassa precipitação [2]. A presença regular de chuvas durante o verão aumenta a umidade do solo, criando uma barreira física para a difusão do radônio, resultando em uma diminuição na taxa de liberação desse gás.

As variações nos padrões de vento também exercem um papel significativo na concentração de radônio no ar, especialmente em regiões de clima tropical. Ventos mais intensos promovem a dispersão do radônio ao favorecer a mistura do ar próximo à superfície com camadas superiores da atmosfera, diluindo suas concentrações. Em contraste, dias com vento fraco tendem a acumular radônio próximo ao solo, resultando em concentrações mais elevadas. A precipitação, além de aumentar a umidade do solo, também pode atuar diretamente na remoção de radônio da atmosfera por meio de processos de deposição úmida. Dessa forma, em períodos de chuva intensa, as concentrações de radônio podem ser significativamente reduzidas, tanto pela menor exalação do solo quanto pela deposição atmosférica. Assim, a interação entre ventos, temperatura e precipitação torna-se fundamental para a compreensão das variações sazonais e diurnas nas medições de radônio.

Ademais, as concentrações de radônio em ambientes fechados diferem entre países (devido a questões de hábitos/costumes, origem de materiais de construção, tipos de solo, condições climáticas etc.) e dentro de cada edifício, principalmente devido a diferenças nos materiais de construção derivado da ornamentação particular de cada indivíduo, ventilação, condições climáticas e hábitos domésticos [4]. No interior dos ambientes internos, o radônio tende a acumular-se e pode ser uma fonte significativa de exposição pública à radiação natural, sendo responsável pela dose interna que o indivíduo recebe, visto que o mesmo é emissor alfa e sua entrada no corpo humano ocorre pelas vias respiratórias [5].

O radônio e sua progênie são responsáveis por 42% da dose total anual de radiação que os indivíduos recebem. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), o radônio é responsável por mais de 15% do câncer de pulmão no mundo, que em 2022 causou mais de 1,8 milhão de mortes, representando 18,7% do total de mortes por câncer [6]. Com esses números, o radônio é considerado a segunda maior causa dessa enfermidade, estando atrás somente do tabaco [7]. Dessa forma, estudos individuais são necessários para identificar a concentração e origem do radônio, levando em conta as características de cada região, permitindo o desenvolvimento de estratégias de mitigação específicas para cada local.

Este estudo tem como objetivo apresentar resultados de uma análise que investiga a influência da variação climática em medidas de radônio no ar, contribuindo assim para a dosimetria desse elemento por meio de estudos da concentração média de radônio em locais com diferentes climas. A metodologia utilizada foi a análise dos resultados obtidos na Campanha de Monitoramento de Radônio em Ambientes Internos de Belo Horizonte (CMRAI-BH) (2022-atualmente), que contou com aproximadamente 500 residências voluntárias, onde foram instalados detectores de radônio alpha-track, tipo CR-39.

## 2. METODOLOGIA

A “Campanha de Monitoramento de Radônio em Ambientes Internos de Belo Horizonte” (CMRAI-BH), como apresenta a Fig. 1, foi inspirada na “Campanha Nacional de Monitorização do Gás Radônio”, da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), e seguiu as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS). A área de realização da campanha foi a cidade de Belo Horizonte/MG, que possui base geológica em rochas arqueanas do complexo granítico-gnáissico e sequências metassedimentares da grande unidade pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, Brasil, sugerindo assim a existência de áreas com elevada radiação de fundo [9]. A



campanha teve como objetivo apresentar o estudo radiométrico à sociedade, e incentivá-la a instalar um detector em suas residências, identificando indivíduos dispostos a instalar uma câmara de difusão em suas casas por três meses na estação seca, e mais três meses na estação chuvosa.

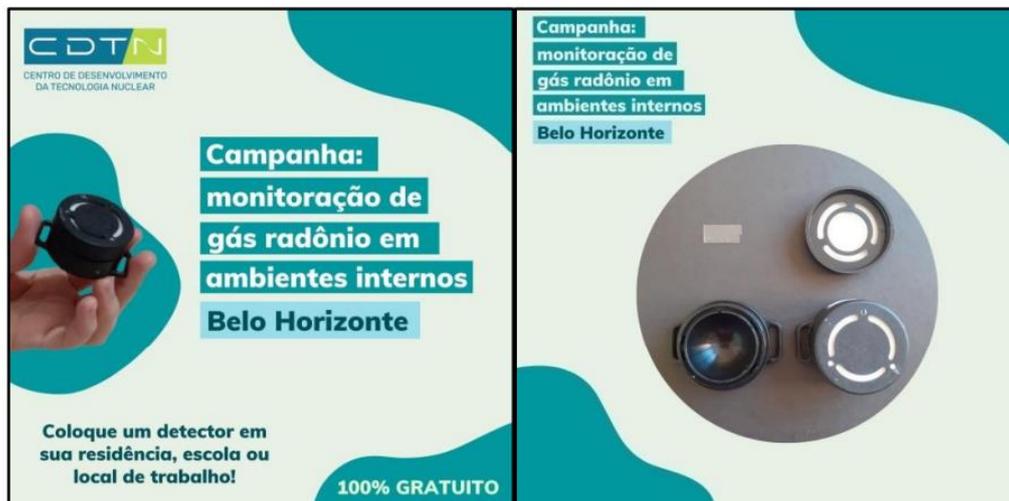


Fig. 1. Panfleto de divulgação da campanha de monitoramento de radônio.

A partir de uma lista de voluntários para a pesquisa, as edificações foram selecionadas de acordo com a distribuição espacial, e em cada local foi instalado um detector passivo de estado sólido do tipo “Columbine Resin”, comumente chamado de CR-39, feito de carbonato de Polialil Diglicol (PADG). O detector CR-39, medindo 1,0 x 1,5 cm, foi colocado dentro da câmara de difusão: um cilindro de 2 cm de altura e 4 cm de diâmetro, como pode ser visto na Fig. 2. Neste sistema, o ar ambiente junto com o radônio passa por um filtro de papel de 125 mm, com filtração lenta para precipitados finos, presente na tampa da câmara. O filtro evita a entrada de produtos de decaimento do radônio, bem como de partículas indesejadas presentes no ar. O tempo de exposição do detector foi de três meses, de acordo com as recomendações da OMS para medições de radiação alfa provenientes do radônio, sendo que os mesmos possuem certificado de calibração do laboratório que os fornece. Além disso, foram realizadas duas campanhas (com duração de três meses cada), sendo elas no período seco e no período chuvoso.



Fig. 2: Detector CR-39 e câmara de difusão.



Após o período estabelecido para permanência dos detectores nos locais estudados, eles foram encaminhados para o Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LRN/CDTN), onde passaram pelo processo de revelação descrito em Takahashi *et al.* [10]. Tal procedimento é útil para que os traços de radiação alfa produzidos nos detectores pelo radônio possam ser visíveis em microscópio óptico (ORTHOLUX) com lente objetiva de 5x e um sensor acoplado à câmera DFC295 (Leica Microsystems Ltd), que permite a captura de imagens da superfície do detector CR-39 através do software LAS V3.8. Posteriormente, para contagem do número de traços, foi utilizado o software Quantikov [11] com filtro de  $0,003 \mu\text{m}$  e todas as funções padronizadas, fornecendo a densidade média de traços por  $\text{cm}^2$ . Após a contagem dos traços, o fator de conversão foi aplicado ( $k = 52,03 \pm 0,75[(\text{traços} \cdot \text{cm}^{-2})/(\text{kBqdm}^{-3})]$ ) [12], obtido em sistemas calibrados para converter densidade de traços em concentração de radônio.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir de 516 residências estudadas pela Campanha de Monitoramento de Radônio em BH, foram realizados cálculos estatísticos com o intuito de analisar os resultados das concentrações de radônio para o período seco e para o período chuvoso. Tais dados foram representados na Tab. 1, que contém o número de dados (N amostral), valores mínimos, quartil de 25%, medianas, valores médios, quartil de 75% e valores máximos das concentrações de radônio.

Tab. 1. Concentrações de Radônio em BH - períodos seco e chuvoso ( $\text{Bq/m}^3$ ).

	Período Seco	Período Chuvoso
<b>Número de dados (N)</b>	516	516
<b>Mínimo</b>	<LD	<LD
<b>25%</b>	8,86	<LD
<b>Mediana</b>	37,97	12,25
<b>Média</b>	60,91	33,27
<b>75%</b>	75,84	44,5
<b>Máximo</b>	1186,03	983,33

<LD : menor que o limite de detecção.

Dessa forma, os resultados da CMRAI-BH (2022-atualmente) do LRN/CDTN claramente mostram maiores concentrações durante o período seco. O período chuvoso em países como o Brasil tende a ser a época mais quente do ano, sendo assim, nos momentos em que não há chuva, os ambientes permanecem abertos por questões de calor e também para diminuição da umidade nas casas. Foi possível averiguar, a partir dos trabalhos de Santos (2010) e Dantas (2016), que nas localidades com clima tropical a concentração de radônio é menor durante o período chuvoso (verão), paralelamente a maiores concentrações no período seco [2, 8].

A análise da concentração de radônio em uma localidade com clima semiárido, realizada por Dantas (2016), revelou valores máximos em torno de  $25 \text{ Bq/m}^3$  (período seco) e  $16 \text{ Bq/m}^3$  (período chuvoso), e mínimos de  $4 \text{ Bq/m}^3$  (período seco) e  $3 \text{ Bq/m}^3$  (período chuvoso) [8]. Durante o período seco, observam-se níveis mais elevados de radônio, o que pode estar correlacionado com temperaturas mais altas e uma menor umidade relativa do ar do período. Já a avaliação da concentração de radônio em uma localidade com clima tropical apresentou valores máximos em torno de  $14 \text{ Bq/m}^3$  (período seco) e mínimos de  $3 \text{ Bq/m}^3$  (período chuvoso) [8]. Durante os períodos de maior incidência de energia solar, observou-se uma maior insolação, temperaturas mais altas e uma umidade relativa mais baixa, o que favoreceu concentrações mais



elevadas do gás, segundo Dantas (2016). No trabalho em questão, verificou-se também que a velocidade do vento se comporta inversamente em relação à concentração de radônio, com variações distintas entre os períodos diurno e noturno. Por outro lado, as localidades que possuem clima temperado são caracterizadas por temperaturas proporcionalmente mais frias ao longo do ano, de forma que os ambientes tendem a ficar mais tempo fechados, no inverno e no verão. Ademais, as regiões de clima temperado são geralmente mais desenvolvidas economicamente e com condições climáticas mais intensas, logo os ambientes são, em sua maioria, climatizados, além de apresentarem a cultura de subsolos/porão; fatores que favorecem um maior acúmulo de radônio.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde, as mudanças climáticas são a maior ameaça à saúde humana, sendo também uma das emergências de saúde mais urgentes enfrentadas pela sociedade. Com base em um crescente número de pesquisas que confirmam as incontáveis e inseparáveis ligações entre o clima e a saúde [14], reforça-se a importância das discussões acerca do assunto, como forma de proteção à saúde pública.

As consequências das drásticas mudanças climáticas que vem ocorrendo no Brasil e no mundo já podem ser facilmente identificadas, como por exemplo, as enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul em abril de 2024, bem como a redução da disponibilidade dos recursos hídricos nas áreas áridas e semiáridas do nordeste do país. Com isso, reforça-se a necessidade de estudar o radônio em diferentes climas, tendo em vista sua relação com as recorrentes mudanças climáticas, com o intuito de determinar medidas de mitigação eficazes levando em consideração as particularidades de cada região e as ações comportamentais de cada população.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir da implementação da metodologia estabelecida para o trabalho, que consistiu em uma revisão bibliográfica e no levantamento de dados primários a respeito da concentração de radônio em residências da cidade de Belo Horizonte, nos períodos secos e chuvosos, foi possível determinar a situação da acumulação do gás em ambientes internos. Os resultados encontrados estão em concordância com os dados de pesquisas similares disponíveis na literatura.

O presente trabalho sugere a existência de variações relevantes da concentração do radônio em função do clima, mesmo em ambientes internos, o que pode servir de fonte de dados para pesquisas futuras. As maiores concentrações de radônio no período seco reforçam a necessidade de estabelecer medidas de mitigação eficientes, a fim de evitar a exposição excessiva da população ao gás. Além disso, tais medidas devem estar em concordância com as características e peculiaridades de cada local, levando em consideração o clima, que, como visto, influencia diretamente na concentração e permanência do radônio nos ambientes.

#### AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e financiamento das bolsas de Iniciação Científica. Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) pela disponibilização de sua infraestrutura, bem como de seus laboratórios, que foram fundamentais para o desenvolvimento dessa pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2019 Report*. United Nations, New York (2020).



[2] T. O. Santos. Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. Dissertação, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, (2010).

[3] Bonotto, D. M. **Radioatividade nas águas: Da Inglaterra ao Guarani**. 1st ed. São Paulo: UNESP, 2004.

[4] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources, effects and risks of ionizing radiation**. In: REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY OF UNSCEAR. United Nations, New York, 2000.

[5] United States Environmental Protection Agency (EPA US). “Consumer's guide of Radon Reduction - How to fix your home”, (2016).

[6] ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). Carga global de câncer aumenta em meio à crescente necessidade de serviços. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/1-2-2024-carga-global-cancer-aumenta-em-meio-crescente-necessidade-servicos> . Acesso em: 23 ago. 2024.

[7] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Who handbook on indoor radon: a public health perspective. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>. Acesso em: 27 jun. 2024.

[8] V. A. Dantas. Influência das condições meteorológicas na concentração de radônio em área de caatinga e mata atlântica dunar. Tese, Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil (2016).

[9] TAKAHASHI, L. C., *et al.* “Região metropolitana de Belo Horizonte: potencial de estudo da radioatividade natural”. In: Anais da Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações. Brasil, Belo Horizonte, 2022.

[10] TAKAHASHI, L. C. Radon dosimetry using Solid State Nuclear Track Detectors in different environments: a review. **Journal Applied Radiation and Isotopes**, vol. 186, p.110217, 2022.

[11] PINTO, L.C.M. Quantikov: uma analisador microestrutural para o ambiente Windows. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo,1996.

[12] TAKAHASHI, L. C. Calibration of Solid State Nuclear Track Detectors CR-39 for radon study in a high concentration underground mines. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, vol. 09-01A, (2021).

[13] NAÇÕES UNIDAS - BRASIL. Mudanças climáticas são a maior ameaça à saúde humana, afirma OMS. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/151400-mudancas-climaticas-maior-ameacas-saude-humana-afirma-oms>. Acesso em: 30 jul. 2024.

[14] LUCIO, P. S., *et al.* Caracterização de séries climatológicas pontuais via análise canônica de correspondência. Estudo de caso: Belo Horizonte - MG (Brasil). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2-3, p. 193–207, jul. 1999.