

**AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE AMBIENTAL EM ANOMALIAS
GEOLÓGICAS DA REGIÃO CENTRAL DE BELO HORIZONTE:
INFLUÊNCIAS NATURAIS E ANTRÓPICAS**

Isabela N. S. Ferreira ¹; Júlia B. Severo ²; Laura C. Takahashi ³; Ricardo G. Passos ⁴

Resumo – A presença de radiação ionizante no ambiente, especialmente em áreas urbanas assentadas sobre formações geológicas ricas em minerais radioativos, pode representar um fator de risco à saúde pública que demanda atenção. A região central de Belo Horizonte, inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, apresenta características litológicas que favorecem a emissão natural de radônio e de radiação gama. Este trabalho investigou a distribuição espacial desses agentes radiológicos por meio de varredura gama, dosimetria com TLDs e análise da concentração de radônio em ambientes internos, integrando os dados com ferramentas de geoprocessamento. A sobreposição dos resultados revelou uma ausência de correlação direta entre os maiores valores de contagem gama e os pontos de maior concentração de radônio e dose equivalente, sugerindo que fatores antropogênicos, como hábitos dos moradores e condições de ventilação, influenciam significativamente a exposição radiológica interna. Diante disso, o estudo teve como objetivo avaliar a dose de radiação gama e a concentração de radônio na área estudada, considerando a influência de aspectos naturais e antrópicos, e contribuindo para o entendimento da radioatividade ambiental em contextos urbanos complexos.

Abstract – The presence of ionizing radiation in the environment, especially in urban areas settled on geological formations rich in radioactive minerals, may represent a risk factor to public health that demands attention. The central region of Belo Horizonte, inserted in the geological context of the Iron Quadrangle, presents lithological characteristics that favor the natural emission of radon and gamma radiation. This study investigated the spatial distribution of these radiological agents by means of gamma scanning, dosimetry with TLDs and analysis of radon concentration in indoor environments, integrating the data with geoprocessing tools. The overlapping of the results revealed a lack of direct correlation between the highest gamma count values and the points of highest radon concentration and equivalent dose, indicating that anthropogenic factors, such as residents' habits and ventilation conditions, significantly influence indoor radiological exposure. Therefore, the study aimed to evaluate the dose of gamma radiation and the concentration of radon in the studied area, considering the influence of natural and anthropogenic aspects, and contributing to the understanding of environmental radioactivity in complex urban contexts.

Palavras-Chave – Radônio; radiação gama; radiação natural; dosímetros termoluminescentes.

¹ Eng., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439- 9623, isabela.ferreira@cdtn.br

² Eng., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439- 9623, julia.severo@cdtn.br

³ Tecn. em Radiol., MSc, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439-9623, laura.takahashi@cdtn.br

⁴ Eng., PhD, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439-9623, Ricardo.passos@cdtn.br

1. INTRODUÇÃO

A gravidade dos efeitos biológicos da radiação gama está diretamente relacionada à dose absorvida, à taxa de exposição e à sensibilidade dos tecidos irradiados. No contexto ambiental, essa radiação pode representar um risco tanto para seres humanos quanto para ecossistemas, especialmente em áreas contaminadas por rejeitos radioativos ou processos industriais que envolvem materiais radiativos. A exposição prolongada ou em altas doses pode resultar em efeitos determinísticos severos, como a síndrome aguda da radiação, enquanto doses mais baixas, porém repetidas ou associadas à exposição constante, elevam a probabilidade de efeitos estocásticos, como o desenvolvimento de câncer (Tauhata, 2013). Esses impactos reforçam a importância do monitoramento ambiental e da implementação de estratégias de mitigação para reduzir os riscos associados à radiação ionizante.

A emissão de radiação pode ocorrer naturalmente no ambiente. A radioatividade natural varia entre as regiões, e altos níveis de radiação ocorrem devido a vários fatores, como altitude, formação rochosa, geologia local, pedologia e a presença de urânio e outros minerais radioativos (UNSCEAR, 2019). 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 (Santos, 2010):

- ^{222}Rn (tempo de meia-vida, $t_{1/2}$, de 3,82 d), que é um gás nobre radioativo e um membro da série de decaimento do ^{238}U ;
- ^{219}Rn ($t_{1/2} = 3,96$ s), da série de decaimento do ^{235}U ; e
- ^{220}Rn , conhecido como torônio ($t_{1/2} = 55,6$ s), que pertence à série de decaimento do ^{232}Th .

O radionuclídeo precursor do ^{222}Rn é o ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1600$ a), do ^{220}Rn é o ^{224}Ra ($t_{1/2} = 3,63$ d) e do ^{219}Rn é o ^{223}Ra ($t_{1/2} = 11,43$ d) (Angeli, 2013). Os isótopos de radônio se originam de solos e rochas e, portanto, podem estar presentes em altas concentrações em locais com dispersão atmosférica reduzida, como minas, cavernas e até mesmo edifícios.

O radônio e sua progênie são responsáveis por 42% da dose total anual de radiação que os indivíduos recebem. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o radônio é responsável por mais de 15% dos cânceres de pulmão no mundo, que em 2018 causaram mais de 1,76 milhão de mortes, sendo o radônio a segunda maior causa dessa doença, atrás apenas do tabaco (WHO, 2009). A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) enfatiza que os níveis de radônio em ambientes fechados dependem da composição geológica e pedológica da área e dos materiais de construção envolvidos (IAEA, 2019).

A termoluminescência é um fenômeno físico pelo qual certos materiais emitem luz quando aquecidos, após terem sido previamente expostos à radiação ionizante. Esse processo ocorre devido à absorção da energia da radiação e sua retenção em estados metaestáveis dentro da estrutura cristalina do material. Quando a temperatura do material aumenta, essa energia é liberada na forma de luz, cuja intensidade é proporcional à quantidade de radiação absorvida. Esse princípio é amplamente utilizado na dosimetria de radiação, permitindo a medição da exposição à radiação ionizante em diversos contextos, como ambientes ocupacionais, monitoramento ambiental e aplicações médicas (Campos, 1998).

Os dosímetros termoluminescentes (TLDs) são dispositivos baseados nesse fenômeno e utilizados para monitoramento ambiental através da determinação do equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$). Eles consistem em materiais sólidos contendo dopantes ou impurezas, que atuam como armadilhas para elétrons excitados pela radiação (Takahashi, 2023). Durante a leitura dos TLDs, o material é aquecido, liberando os elétrons presos e gerando a emissão de luz, que é então captada por um sistema de detecção. A intensidade da luz emitida permite determinar a dose de radiação absorvida pelo dosímetro. Dentre os materiais mais comuns utilizados em TLDs, destacam-se o fluoreto de lítio dopado com magnésio, cobre e fósforo (LiF:Mg,Cu,P) e o fluoreto de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaF}_2\text{:Dy}$), variando conforme a sensibilidade desejada e a aplicação específica (Oliveira, 2010).

Os TLDs medem a grandeza equivalente de dose ($H^*(10)$), que representa a radiação gama que interagiu com ele. A radiação gama é uma forma de radiação eletromagnética de alta energia, caracterizada por sua capacidade de penetrar profundamente nos materiais e tecidos biológicos. Essa propriedade a torna especialmente relevante em diversas aplicações médicas, como na radioterapia para o tratamento de câncer, no entanto, devido ao seu alto poder de penetração, a radiação gama também apresenta riscos significativos à saúde humana. Ao interagir com células biológicas, pode causar ionizações que levam à quebra de moléculas essenciais, como o DNA, resultando em danos celulares que podem ser agudos ou crônicos, dependendo da dose recebida e do tempo de exposição (Oliveira, 2016).

Levantada a hipótese do possível risco radiométrico devido à alta contagem de radionuclídeos naturais (U e Th) na área central de Belo Horizonte (Duarte, 2017; Corrêa 2019, Taveira, 2024), o objetivo deste estudo foi levantar dados para avaliar o real risco de saúde relacionado à radiação ionizante (alfa e gama) que as pessoas estão expostas. Nesse contexto, este estudo busca complementar esses trabalhos, abordando lacunas ainda existentes e ampliando o conhecimento sobre os impactos da radioatividade ambiental. Sendo assim, foi proposta a avaliação detalhada das doses de radiação em ambientes internos da região estudada, a partir de pesquisas anteriores conduzidas pelo Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LRN/CDTN) que analisaram a influência das características geológicas nas concentrações de radônio e radiação gama, com o objetivo de contribuir para a saúde pública (Takahashi, 2023). Para isso, buscou-se quantificar as doses de radiação gama por meio de dosímetros termoluminescentes (TLDs), avaliando a possível associação entre sua distribuição espacial com um estudo prévio de varredura gama do LRN/CDTN e também com as concentrações de radônio nos locais estudados, analisando possíveis fatores ambientais, geológicos e antropogênicos que influenciam sua distribuição. Além disso, pretende-se avaliar espacialmente os dados obtidos, avaliando a possível existência de uma relação direta entre a radiação gama e o radônio, e comparar os resultados com levantamentos prévios. Por fim, este estudo visa discutir os impactos da exposição à radiação ionizante, considerando a dose recebida pelos indivíduos e a relevância do monitoramento radiométrico na área investigada. A avaliação desses fatores é fundamental para compreender os potenciais impactos da radiação natural sobre a população e contribuir para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e controle da exposição.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo foi a cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, que corresponde à sexta maior capital do Brasil. Em 2022, a população estimada da cidade era de 2.315.560 habitantes, e a densidade demográfica de 6.988,18 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2025). Em relação à geologia local, a cidade e 70 % de sua região metropolitana tem base geológica em rochas arqueanas do complexo granítico-gnáissico (Complexo Belo Horizonte) e sequências metassedimentares da grande unidade pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, sugerindo assim a existência de áreas com alta radiação de fundo (Takahashi, 2022).

O município está inserido na grande unidade geológica conhecida como cráton do São Francisco (Almeida, 1984), que possui como limite meridional o Quadrilátero Ferrífero (QF). O QF apresenta seu contexto geológico caracterizado por três grandes conjuntos de rochas principais: complexos metamórficos de rochas cristalinas arqueanas; sequência do tipo *greenstone belt* arqueana representada pelo Supergrupo Rio das Velhas; sequência metassedimentar paleoproterozóica, do Supergrupo Minas (Azevedo, 2007).

O Supergrupo Minas caracteriza-se pela presença de rochas metassedimentares, e possui como subgrupos os grupos: Sabará, Piracicaba, Itabira e Caraça. O Grupo Sabará corresponde à unidade litológica mais espessa do Supergrupo Minas, constituído predominantemente por xistos e filitos bastante intemperizados, conglomerados e metagrauvacas (Corrêa, 2019). Já o Grupo Piracicaba compreende predominantemente rochas metassedimentares, incluindo filitos,

quartzitos e carbonatos metamorfizados. O Grupo Itabira é constituído por duas formações: a Formação Gandarela e a Formação Cauê, sendo esta última composta predominantemente por formações ferríferas bandadas (BIF – *Banded Iron Formation*), intercaladas com itabiritos, que são rochas formadas por camadas alternadas de quartzo e óxidos de ferro (hematita e magnetita) (Carmo, 2023).

Durante o planejamento e a construção de Belo Horizonte no final do século XIX, a necessidade de materiais resistentes e de fácil obtenção impulsionou a exploração de pedreiras próximas ao centro urbano. Rochas extraídas dessas pedreiras foram utilizadas na construção de edificações históricas, na fundação de vias públicas e em estruturas como pontes e muros de contenção. A abundância de recursos minerais na região facilitou o crescimento da cidade e contribuiu para sua rápida expansão ao longo do século XX (Ruchkys de Azevedo, 2007).

As pedreiras desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento urbano de Belo Horizonte, fornecendo materiais essenciais para a construção civil desde a fundação da cidade. Localizadas em diversos pontos do município, e de sua região metropolitana, essas áreas de extração forneceram rochas como gnaisses, quartzitos e granitos, amplamente utilizados na pavimentação, edificação e infraestrutura da capital mineira (Ruchkys de Azevedo, 2007).

Para o presente trabalho, um detalhamento maior da área de estudo foi feito ao escolher a área central da cidade, mais especificamente dentro da Avenida do Contorno, que correspondia aos limites da cidade no projeto original. Pesquisas anteriores conduzidas no LRN/CDTN indicam a distribuição das taxas de contagem gama total na região delimitada pela Avenida do Contorno, onde foram registradas taxas classificadas como “muito alto”, superiores a 400 contagens por segundo (cps), utilizando-se o Espectrômetro Gama RS-230 BGO (Duarte, 2017), como mostra a Figura 1. Esse elevado valor possivelmente está associado às características do substrato geológico local, influenciado pelo uso de materiais extraídos das pedreiras na pavimentação da cidade (Corrêa, 2019).

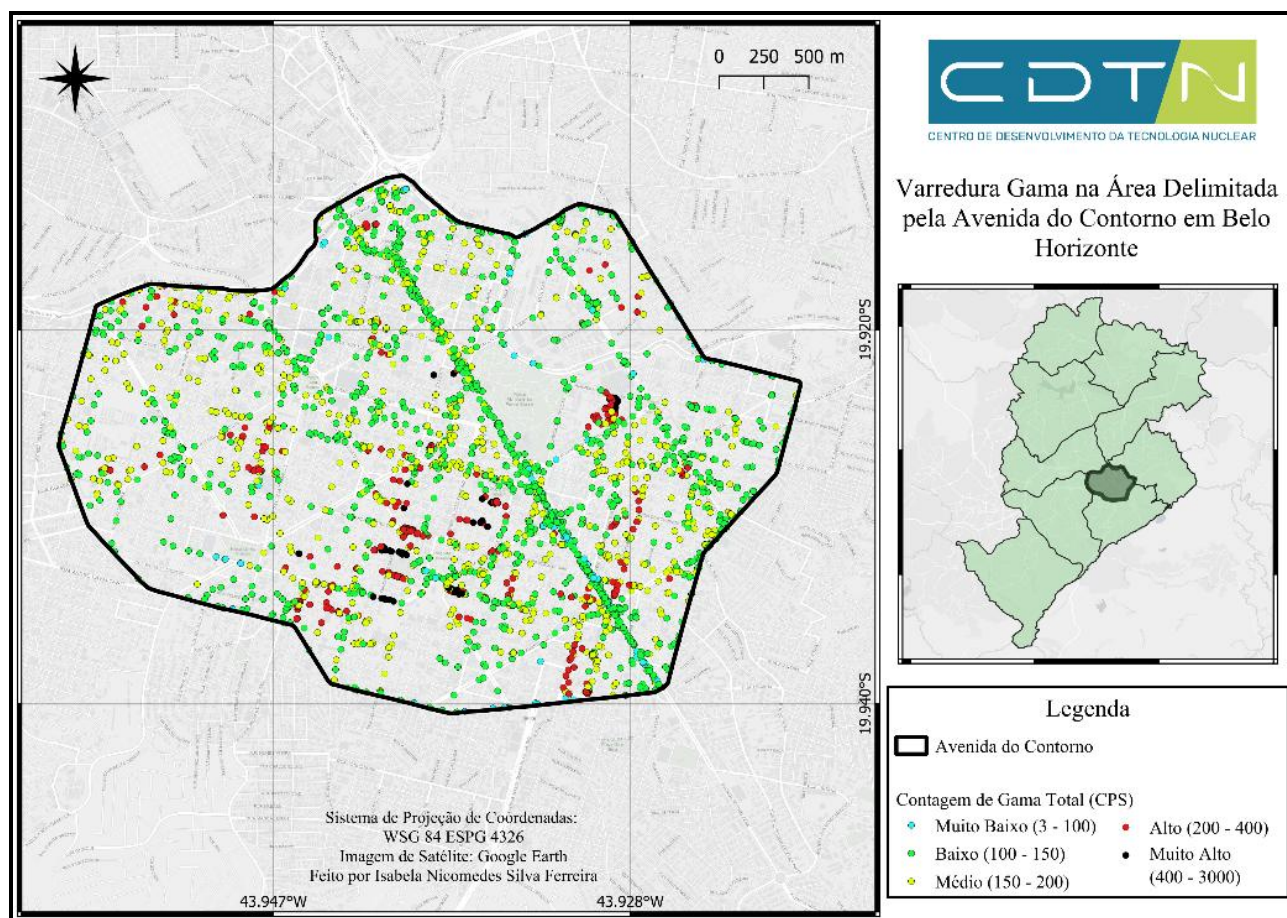


Figura 1. Varredura gama na área delimitada pela Avenida do Contorno em Belo Horizonte. Fonte: os autores.

2.2. Campanha de monitoramento de radônio em ambientes internos de Belo Horizonte

A "Campanha de Monitoramento de Radônio em Ambientes Internos de Belo Horizonte (CMRAI/BH)" foi desenvolvida pelo Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LRN/CDTN) para estudar e avaliar a radiação natural da cidade, e apresentar o estudo radiométrico à sociedade, incentivando-a a instalar um detector em suas casas. Inspirada na Campanha Nacional de Monitoramento do Gás Radônio da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), a campanha segue as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS).

A partir de uma lista de voluntários para a pesquisa, as edificações foram selecionadas de acordo com a distribuição espacial, e a escolha dos pontos de estudo foi feita com base nas localizações disponibilizadas pelas pessoas que voluntariamente aderiram à campanha. Em cada local, foi colocada uma câmara de difusão (um cilindro de 2 cm de altura e 4 cm de diâmetro) com um detector passivo de longo estado do tipo Resina Columbina, comumente chamado de CR-39 (*Polyallyl Diglycol Carbonate* (PADC)), e três dosímetros termoluminescentes, como mostra a Figura 2. Neste sistema, o ar ambiente, juntamente com o radônio, passa por um filtro de papel de 125 mm para precipitados finos, presente na tampa da câmara. O filtro impede a entrada de produtos de decaimento do radônio que podem estar associados ao material particulado do ar, bem como outras partículas indesejadas.

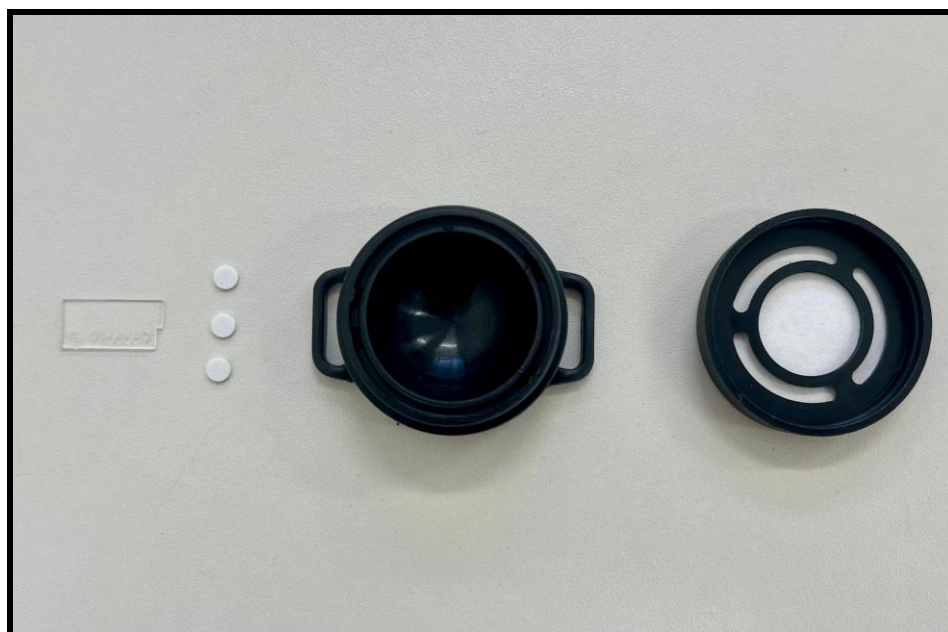


Figura 2. Dispositivo de monitoramento: (1) Detector CR-39; (2) Dosímetros termoluminescentes – TLDs; (3) Câmara de difusão.

O tempo de exposição foi de três meses, de acordo com as recomendações da OMS para medições de radiação alfa do radônio. Após o período estabelecido para a permanência nos locais estudados, eles foram encaminhados para o LRN/CDTN, onde passaram pelo processo de revelação (Takahashi, 2022). Este procedimento é útil para que os traços de radiação alfa feitos nos detectores pelo radônio possam ser visíveis sob um microscópio óptico.

O microscópio utilizado (modelo ORTHOLUX, com lente objetiva de 5x) foi acoplado a uma câmera, que permitiu a captura de imagens da superfície do detector CR-39 através do software LAS V3.8. Posteriormente, para a contagem do número de traços, foi utilizado o software Quantikov (Pinto, 1996) com filtro de 0,003 μm e todas as funções padronizadas, fornecendo a densidade média de traços por cm^2 . Após a contagem dos traços, foi aplicado o fator de conversão para converter a densidade dos traços em concentração de radônio. Este coeficiente foi obtido em laboratório, utilizando sistemas de calibração (Takahashi, 2021).

2.3. Radiação gama

Ao longo dos últimos anos, pesquisadores do LRN/CDTN realizaram varreduras gama pela cidade de Belo Horizonte utilizando o espectrômetro RS-230 (RadiationSolutions/CANADÁ), autoportado, acoplado a um Sistema de Posicionamento Global (GPS). As coordenadas obtidas foram usadas no geoprocessamento através do programa ArcGis®, permitindo a identificação de forma quantitativa e qualitativamente dos radionuclídeos ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , e consequentemente os valores em contagens por segundo (CPS), ou seja, quantos decaimentos por radiação gama ocorreram por segundo.

Além disso, o presente trabalho contou também com a análise de radiação gama nos ambientes internos de Belo Horizonte (casas e locais de trabalho), medidas por meio dos dosímetros termoluminescentes (TLDs) do tipo LiF: Mg, Cu, P (MCP), presentes nos dispositivos de monitoramento da CMRAIBH. Após leitura dos TLDs no Laboratório de Calibração do CNTN, o estudo obteve como resultado a grandeza equivalente de dose $H^*(10)$, que representa a radiação gama que interagiu com o TLD.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados obtidos por meio da varredura gama, nas doses equivalentes mensuradas por dosímetros termoluminescentes (TLDs) e nas concentrações de radônio em ambientes internos disponibilizadas pela CMRAI/BH, foi possível avaliar possíveis associações entre esses parâmetros. Para melhor visualização e análise espacial desses dados, foram elaborados mapas utilizando os softwares QGIS® e ArcGIS®, permitindo a representação georreferenciada dos valores obtidos. Essa abordagem possibilitou a identificação de padrões espaciais de distribuição da radioatividade, contribuindo para uma avaliação mais robusta das influências naturais e antrópicas nas anomalias geológicas da região central de Belo Horizonte.

A partir dos dados de contagem de radiação gama total, foi gerado um mapa de calor utilizando a ferramenta de interpolação do software ArcGIS®. A interpolação foi realizada com base na técnica de ponderação por distância inversa (IDW – *Inverse Distance Weighting*), que estima valores em uma superfície *raster* a partir de pontos amostrados, atribuindo maior influência aos pontos mais próximos (ESRI, 2024). O parâmetro utilizado como atributo de interpolação foi a contagem gama expressa em CPS (contagens por segundo), sendo esses valores empregados como pesos na modelagem espacial da distribuição da radiação gama. Com o mapa de calor gerado, foi possível realizar a sobreposição dos dados referentes à concentração de radônio em ambientes internos (conforme ilustrado na Figura 3), bem como das doses equivalentes medidas pelos dosímetros termoluminescentes (TLDs) (conforme apresentado na Figura 4). Essa sobreposição permitiu uma análise integrada e espacialmente referenciada das diferentes fontes e intensidades de radioatividade presentes na área de estudo.

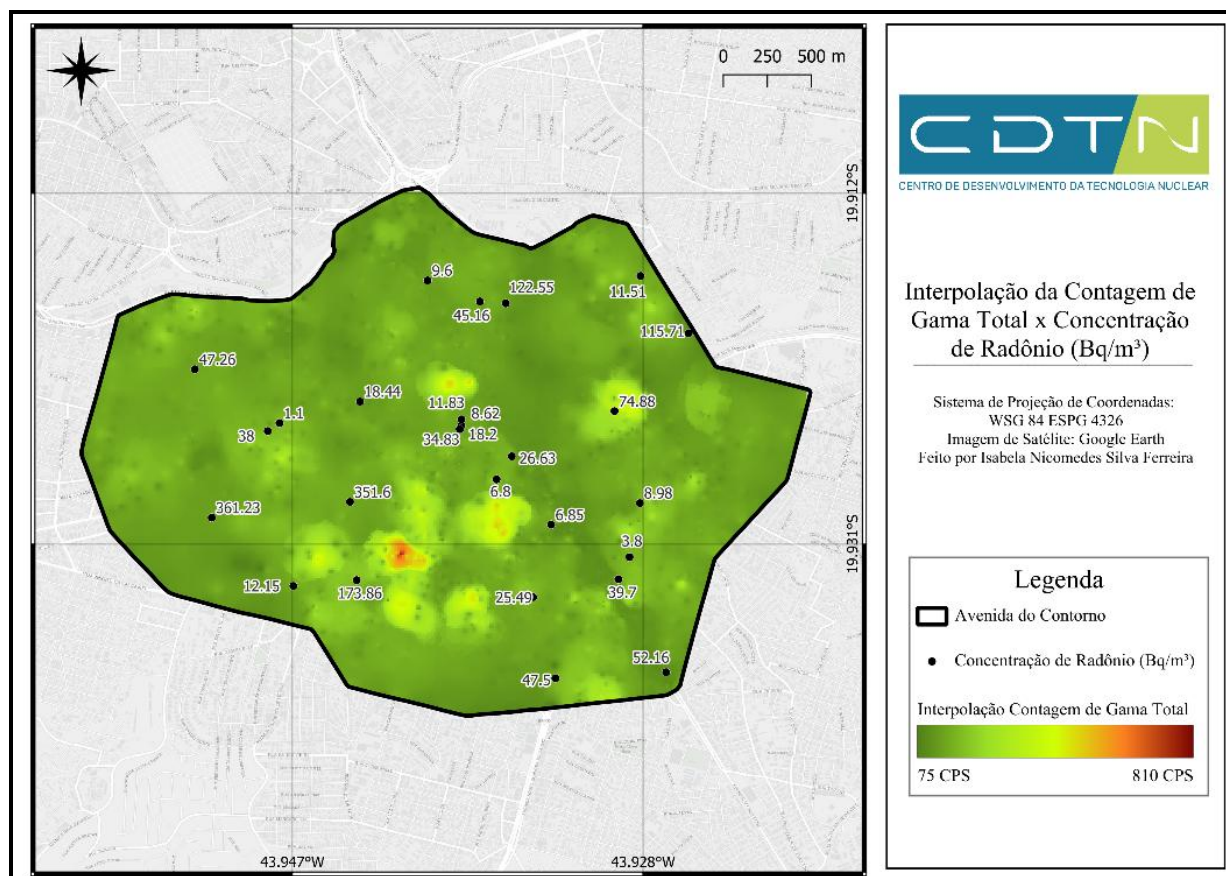


Figura 3. Interpolação da contagem gama total e concentração de radônio em Bq/m³.

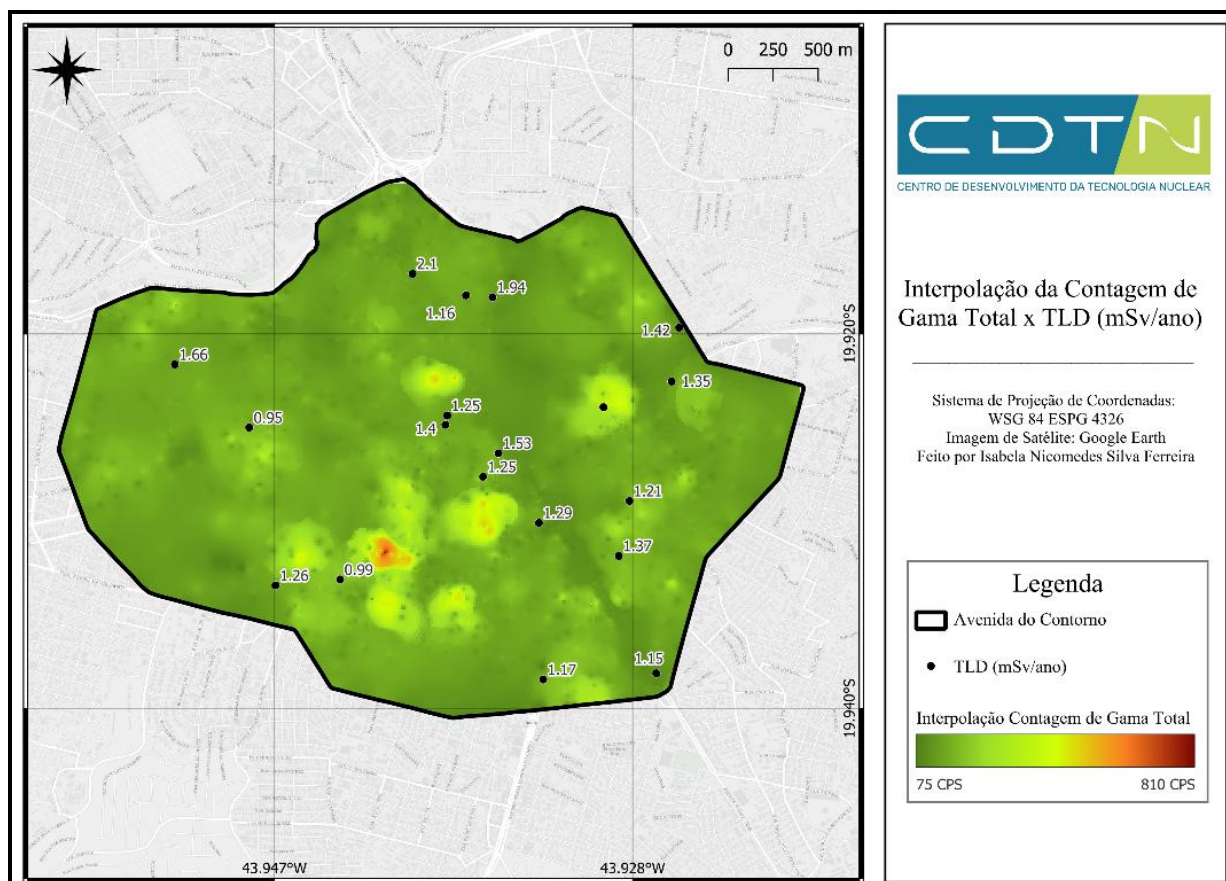


Figura 4. Interpolação da contagem gama total e valores dos TLDs em mSv/ano.

A análise integrada dos mapas de interpolação gerados a partir da contagem gama total, das doses equivalentes medidas pelos dosímetros termoluminescentes e das concentrações de radônio revelou padrões distintos de distribuição para cada um dos parâmetros. A ausência de coincidência espacial, ao menos visualmente, entre os pontos de maior intensidade de radiação gama externa e os locais com maiores concentrações de radônio e maiores doses medidas pelos TLDs destaca a complexidade da interação entre fontes naturais e influências antrópicas.

Além disso, a diferença entre os valores obtidos na varredura gama e nas doses registradas pelos TLDs evidencia que a radiação externa, ainda que importante como parâmetro de fundo, não pode ser considerada isoladamente como indicativo de risco radiológico pelos indivíduos. O TLD, por sua capacidade de mensurar a dose equivalente ambiental $H^*(10)$, reflete a interação real da radiação com o corpo humano, sendo uma ferramenta essencial para avaliar o risco radiológico à população.

Ainda que a influência da geologia na emissão de radiação natural não possa ser desconsiderada, os resultados reforçam que a avaliação do risco radiológico em áreas urbanas deve considerar também aspectos ambientais, arquitetônicos e comportamentais. A aparente não correspondência direta entre os dados obtidos neste estudo aponta para a necessidade de políticas públicas que estimulem o monitoramento contínuo em ambientes residenciais e ocupacionais, além da adoção de medidas de mitigação adaptadas à realidade local.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que, embora existam áreas com elevadas taxas de contagem gama na área delimitada pela Avenida do Contorno, os valores mais altos de radônio em ambientes internos e as maiores doses equivalentes mensuradas pelos TLDs não coincidem espacialmente com esses pontos. Essa ausência de correlação direta evidencia que a distribuição da radioatividade ambiental não depende exclusivamente das características geológicas locais, ainda que estas exerçam influência significativa, conforme apontado por estudos anteriores. A discrepância observada entre os dados de varredura gama e os níveis de radônio pode ser explicada por uma série de fatores antrópicos, entre eles, os hábitos e práticas dos moradores (como ventilação dos ambientes, materiais de construção utilizados e hábitos de ocupação dos espaços), que impactam diretamente na concentração do gás em ambientes internos. Tal observação reforça a importância do monitoramento individualizado e contínuo dos ambientes residenciais, uma vez que a radiação interna percebida pela população pode não refletir fielmente os dados de radioatividade de fundo coletados externamente.

Apesar da base geológica da região, marcada pela presença de rochas arqueanas do complexo granítico-gnáissico e pelas sequências metassedimentares do Quadrilátero Ferrífero, estar associada a áreas com maior potencial de emissão de radiação, os valores elevados de radônio e de dose equivalente registrados nos dispositivos de medição sugerem que fontes internas e fatores antropogênicos podem intensificar a exposição em determinados ambientes. A aplicação integrada de diferentes métodos de medição, como a varredura gama, os dosímetros termoluminescentes (TLDs) e os detectores CR-39 para radônio, associada à análise espacial por meio de ferramentas de geoprocessamento, mostrou-se eficaz para a avaliação detalhada da radioatividade ambiental. Essa abordagem permitiu não apenas a identificação de anomalias radiológicas, mas também a compreensão mais ampla dos fatores que influenciam sua distribuição.

Diante disso, destaca-se a relevância do monitoramento sistemático da radiação ionizante em áreas urbanas com histórico geológico de anomalias naturais, como é o caso de Belo Horizonte. Além de contribuir para a ampliação do conhecimento científico sobre os efeitos combinados de fatores naturais e antrópicos, os resultados obtidos também podem subsidiar políticas públicas voltadas à saúde ambiental, à segurança radiológica e à prevenção de riscos à população exposta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa. 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 desta pesquisa. Agradecemos também aos voluntários que participaram do estudo radiométrico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (coords.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgar Blucher, 1984. 378 p.

ANGELI, I.; MARINOVA, K. P. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, v. 99, p. 69–95, 2013. DOI: 10.1016/j.adt.2011.12.006.

AZEVEDO, U. R. *Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO*. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-76LHEJ>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CAMPOS, L. L. Termoluminescência de materiais e sua aplicação em dosimetria da radiação. *Cerâmica*, São Paulo, v. 44, n. 290, p. 244–251, dez. 1998. ISSN 1678-4553. DOI: 10.1590/S0366-69131998000600007. Disponível em: <https://www.scienceopen.com/document?vid=2f9f2ac8-8f0c-45a2-8dfd-b9d8fb1a5382>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CARMO, H. A. Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Conceição do Rio Acima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 2023. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5818>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CORRÊA, B. B. G. *Radioatividade natural nas rochas aflorantes da Região Metropolitana de Belo Horizonte*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Radiologia) – Faculdade de Medicina, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Duarte, M. P., Taveira, N. F., Santos, T. O., Lara, E. G., Barreto, A. A., Silva, J. A. R., Rocha, Z., & Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN), Rio de Janeiro, RJ (Brazil). (2017). Interpretation of the natural radioactive anomalies in the central area of Belo Horizonte/Brazil. International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2017), Belo Horizonte, MG (Brazil).

ESRI. *IDW (Inverse Distance Weighted)*. ArcGIS Pro Documentation. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2024. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/idw.htm>. Acesso em: 10 abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Panorama: Belo Horizonte (MG)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>. Acesso em: 10 abr. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). No immediate change needed in IAEA radon protection recommendations. Vienna: IAEA, 2019. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/no-immediate-change-needed-in-iaea-radon-protection-recommendations>. Acesso em: 10 abr. 2025.

OLIVEIRA, G. A. F. de. *Efeito da exposição à radiação ionizante sobre o DNA: uma avaliação cienciométrica*. Dissertação (Mestrado em Genética) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de Ciências Agrárias e Biológicas, Goiânia, 2016. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/3685>. Acesso em: 11 abr. 2025.

OLIVEIRA, M. L.; MAIA, A. F.; NASCIMENTO, N. C. E. S.; FRAGOSO, M. C. F.; GALINDO, R. S.; HAZIN, C. A. Influência da dependência energética de dosímetros termoluminescentes na medida da dose na entrada da pele em procedimentos radiográficos. *Radiologia Brasileira*, v. 43, n. 2, p. 113–118, mar./abr. 2010. ISSN 0100-3984. DOI: 10.1590/S0100-39842010000200012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rb/a/CYWTdFtDSGFV6PBYWwj6My/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

PINTO, L. C. M. *Quantikov: um analisador microestrutural para o ambiente Windows*. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000746870>. Acesso em: 11 abr. 2025.

RUCHKYS DE AZEVEDO, Ú. *Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO*. 2007. 211 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SANTOS, T. O. *Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MBAM-84RMXQ>. Acesso em: 10 abr. 2025.

TAKAHASHI, L. C.; SANTOS, T. O.; CORRÊA, B. B. G.; PINHEIRO, R. M. M.; MENEZES, M. A. B. C.; ROCHA, Z. (in memoriam). Calibration of Solid State Nuclear Track Detectors CR-39 for radon study in a high concentration underground mines. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 9, n. 1A, p. 01–13, 2021. ISSN 2319-0612. Disponível em: <https://www.bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/view/1533>. Acesso em: 11 abr. 2025.

TAKAHASHI, L. C.; SANTOS, T. O.; PASSOS, R. G. Radon dosimetry using Solid State Nuclear Track Detectors in Brazil: applications and perspectives. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 193, 2022, 109990. ISSN 0969-8043. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804322001142>. Acesso em: 11 abr. 2025.

TAKAHASHI, L. C.; SANTOS, T. O.; PASSOS, R. G. 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 – VI SENCIR*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG e Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2022. ISBN 978-85-5722-483-4. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/vi_sencir/563680/. Acesso em: 11 abr. 2025.

TAKAHASHI, L. C.; SQUAIR, P. L.; SANTOS, T. O.; PASSOS, R. G. Instrumentation for measuring equivalent ambient dose in urban buildings using TLDs, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 202, 2023, 111037, ISSN 0969-8043. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.111037>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Tauhata, L., Salati, I. P. A., Di Prinzio, R., Di Prinzio, M. A. R. R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão novembro/2013 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 345p.

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

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva: World Health Organization, 2009. ISBN 9789241547673. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>. Acesso em: 10 abr. 2025.