



Radônio-222 indoor e associação com risco de câncer de pulmão na Região Metropolitana de Recife, Brasil

Mariana Luiza de Oliveira Santos Ramos*; Marcelo da Rocha Leão Magalhães*; Karolayne Esthefany Melo da Silva*; Emerson Emiliano Gualberto Farias*; Elvis Jocir De França*

* Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), Comissão Nacional de Ciências Nucleares (CNEN), Recife, Pernambuco, Brasil.

*Autor para correspondência e-mail: marianasantos_ufpe@hotmail.com

Palavras-chave

Câncer de pulmão
Radônio
Radioproteção
Saúde

Keywords

Lung cancer
Radon
Radioprotection
Health

Resumo: Radônio-222 é um gás nobre considerado carcinogênico humano de Classe 1 conhecido como segunda causa de câncer de pulmão após o tabagismo. Formado a partir do urânio-238 presente no fosforito uranífero que quando exalado para atmosfera pode se acumular em ambientes fechados, representando risco à saúde humana. Este estudo possui o objetivo de analisar o risco de câncer de pulmão associado ao radônio-222 em áreas de ocorrência uranífera localizadas na Região Metropolitana do Recife, PE, Brasil. A monitoração do gás na atmosfera das residências foi realizada por meio da exposição de detectores CR-39 em câmaras de difusão. As concentrações de radônio *indoor* encontradas nas residências estudadas variaram de 2 a 1174 Bq m⁻³, sendo em maior parte superiores aos valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde e União Europeia. Pode-se inferir que este estudo em nível local contribui com as estimativas nacionais de incidência de câncer de pulmão, priorizando a proteção da saúde em áreas habitadas de ocorrência uranífera.

Radon-222 indoor and association with lung cancer risk in the Metropolitan Region of Recife, Brazil

Abstract: Radon-222 is a noble gas considered a Class 1 human carcinogen known as the second cause of lung cancer after smoking. Formed from uranium-238 present in uranium phosphorite which, when exhaled into the atmosphere, can accumulate indoors, posing a risk to human health. This study has the objective of analyze the risk of lung cancer associated with radon-222 in areas of uranium occurrence located in the Metropolitan Region of Recife, PE, Brazil. The monitoring of gas in the atmosphere of residences was carried out by exposing CR-39 detectors in diffusion chambers. The indoor radon concentrations found in the studied residences ranged from 2 to 1174 Bq m⁻³, being mostly higher than the values recommended by the World Health Organization and the European Union. It can be inferred that this study at the local level contributes to national estimates of lung cancer incidence, prioritizing health protection in inhabited areas with uraniferous occurrence.

Recebido em: 11/07/2023

Aprovação final em: 20/08/2023



Introdução

Poluentes atmosféricos em ambientes internos estão entre os principais assuntos tratados em saúde pública. Radônio-222 é um desses poluentes, tido como principal fonte de radiação natural associada à presença de urânio-238 em solos e rochas. É responsável por aproximadamente 55% da radiação incidente sobre o ser humano. Além de ser considerado carcinogênico pela Agência Internacional de Pesquisa do Câncer (AMARAL, 2005; SILVA, 2013; AMARAL, 2018).

Dessa forma, estudos de proteção radiológica e de saúde humana são essenciais em regiões que contêm rochas naturalmente enriquecidas em urânio, como ocorre em áreas dos municípios Abreu e Lima, Paulista e Olinda, localizados na Região Metropolitana de Recife, Pernambuco, Brasil (SOUZA, 2006).

Durante o decaimento do U-238 contido no fosforito uranífero, o radônio pode ser exalado e se acumular em residências, representando um risco potencial à saúde pública (PETTA; CAMPOS, 2013). Em ambientes tropicais, com o surto de doenças geradas por mosquitos, como a Dengue e a Zika, por exemplo, a população tem optado por manter residências fechadas, permitindo o acúmulo do gás dentro de suas moradias, além de uma exposição maior, principalmente pelo home office trazido pela pandemia do Covid-19.

Dentre as possíveis interações com os organismos, as partículas alfas resultantes do decaimento de Rn-222 e seus radionuclídeos-filhos, podem chegar ao epitélio das vias aéreas e causar danos ao DNA e assim, provocar o desenvolvimento de câncer de pulmão (EPA, 2017). Podendo esse risco ser mais elevado em indivíduos tabagistas, visto que existe sinergia entre o tabagismo e a presença de concentrações de atividade desse gás no desencadeamento dessa neoplasia (EPA, 2017).

Para analisar o risco de desenvolver patologias relacionadas à exposição ao Rn-222 em indivíduos que residem em áreas anômalas de ocorrência do fosforito uranífero, faz-se necessário realizar a monitoração das concentrações de atividade desse gás de tais áreas, a fim de verificar a necessidade de intervenções para reduzir ou sanar possíveis danos à saúde da população. O objetivo deste estudo foi analisar o risco de câncer de pulmão associado ao radônio-222 em áreas de ocorrência uranífera localizadas na Região Metropolitana do Recife, PE, Brasil.

Metodologia

Áreas de estudo

Os municípios estudados localizam-se na região Metropolitana de Recife do Estado de Pernambuco, Brasil. Abreu e Lima apresenta uma área municipal de aproximadamente 128,5 km². Com relevo predominantemente de Tabuleiros Costeiros com altitude média de 50 a 100 metros, também abrange platôs de origem sedimentar. O clima é do tipo Tropical chuvoso com verão seco, sendo a precipitação média anual de 1.634,2 mm. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta subperifólia, com partes de Floresta subcaducifólia e cerrado (CPRM, 2015; IBGE, 2020).

Paulista apresenta área municipal de aproximadamente 561km². Apresenta clima Aw'- Quente-úmido com chuvas de verão e outono. A pluviometria média anual é da ordem de 886 mm. A vegetação é do tipo Caatinga-Sertão, sendo o relevo predominantemente ondulado (IBGE, 2020).

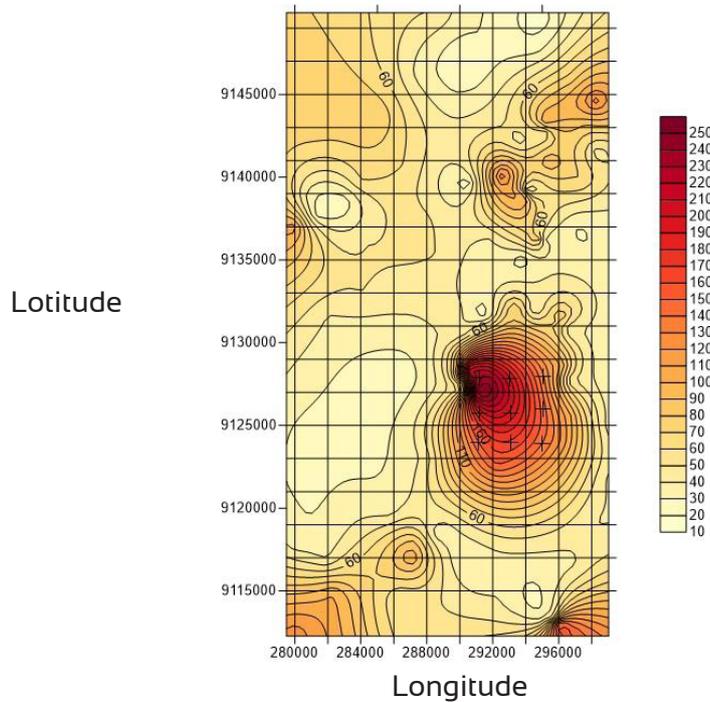
E Olinda compreende uma extensão territorial de 42 Km². Possui clima do tipo quente e úmido, com temperatura média anual de 27 °C, amplitude térmica de 5 °C e precipitação pluviométrica total anual entre 1000 e 2000 mm. É considerada a terceira maior cidade de Pernambuco, com uma população de acordo com o censo de 2019 realizado pelo IBGE de 392.482 habitantes (IBGE, 2020).

Amostragem

Foram definidas como unidades amostrais as residências próximas às áreas de radiação anômalas com valores acima de 120 contagens por segundo (cps) de acordo com o resultado do levantamento radiométrico realizado por Souza¹⁰ apresentado na Figura 1 e as localizações geográficas dos pontos de estudo estão detalhadas na Figura 2.

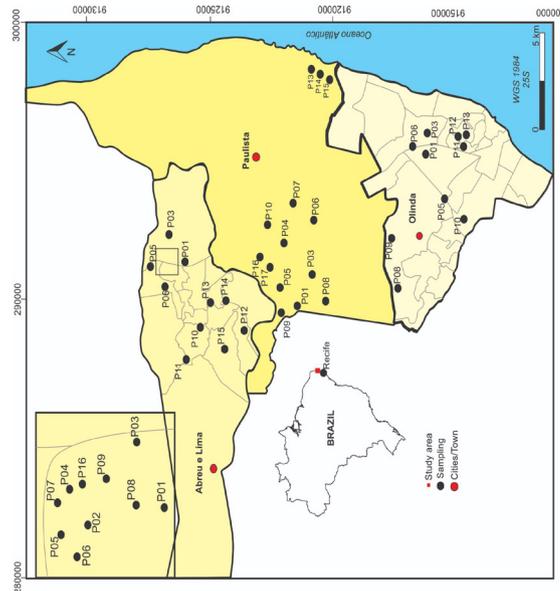


Figura 1 - Mapa de isolinhas de radioatividade natural em contagem por segundo efetuado por Souza¹⁰ e utilizado como base para seleção das regiões de estudo.



Fonte: Adaptado de Souza (2006).

Figura 2 - Localização das unidades amostrais nos municípios de Abreu e Lima, Paulista e Olinda.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O tamanho das áreas estudadas foi norteado pelo levantamento radiométrico realizado por Souza¹⁰ foram de aproximadamente 15 km² em Abreu e Lima, 20 km² em Paulista e 30 km² em Olinda. No total, 47 habitações foram amostradas entre 2017 e 2019, sendo 17 residências em Abreu e Lima (a monitoração do radônio iniciou-se em abril de 2017 e foi concluída em março de 2018), 17 em Paulista (monitoração iniciou-se em julho de 2017 e foi concluída em abril de 2018) e 13 em Olinda (monitoração iniciou-se em outubro de 2018 e foi concluída em outubro de 2019).



Um dos fatores mais preponderantes para a definição do número amostral foi a segurança na amostragem e convencimento com relação à necessidade de participação na pesquisa. Contudo, para fins da pesquisa, foi realizada a estimativa de número amostral para um erro de 40% a partir da metodologia de cálculo de tamanho amostral (VISHWAKARMA, 2017). As monitorações foram realizadas durante a estação seca e chuvosa.

Levantamento radiométrico da área do fosforito uranífero

A radiação de fundo (background) das áreas do fosforito uranífero dos municípios de Abreu e Lima, Paulista e Olinda foram monitoradas com a utilização de um cintilômetro portátil, modelo SAPHYMO SRAT SPP2 NF, composto por um cristal de NaI(Tl) de diâmetro 3,8 cm e comprimento de 2,5 cm e calibrado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco – DEN/UFPE. As medições foram realizadas a 0,7 m do solo, percorrendo transecto de 100 m. Os dados foram obtidos com intervalos de 0 cps a 150 cps, e de 0 a 500 cps nos locais com níveis de radioatividade mais elevados. Um Sistema de Posicionamento Global (GPS) foi necessário para o georreferenciamento dos locais avaliados (FARIAS *et al.*, 2015; AMARAL, 2018).

Medição do radônio-222 indoor

A monitoração do gás radônio-222 em residências foi realizada por meio da exposição de detectores CR-39 em câmaras de difusão de forma cilíndrica com 5 cm de diâmetro externo, com volume de 89 ml. A área exposta do detector CR-39 foi de 9 cm² (3 cm x 3 cm) e as câmaras de difusão foram preparadas no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste – CRCN-NE.

As residências avaliadas quanto à constituição variaram de alvenaria com ou sem revestimento, piso revestido ou de terra batida, abastecimento de água encanada ou poço na propriedade, geminada ou não e apoiada diretamente sobre o solo. A quantidade de residências foi definida de acordo com o tamanho da área com afloramentos do fosforito uranífero e disponibilidade dos moradores para permitir a instalação das câmaras em suas residências.

Foram instaladas 176 câmaras, das quais 78 foram distribuídas em Abreu e Lima, 50 em Paulista e 48 em Olinda, das quais 39 foram extraviadas e 137 recuperadas. Os detectores CR 39 foram colocados nas residências na altura aproximada de um metro por um período mínimo de 03 meses por estação seca e chuvosa (BURKE *et al.*, 2010; ALI *et al.*, 2018).

Posterior ao recolhimento dos detectores, estes passaram por revelação química de acordo a metodologia de Ahn e Lee (2005), sendo utilizada solução reveladora com concentração de 6,25 mol L⁻¹ de NaOH em banho-maria a 90 °C por um período de 5 horas, possibilitando a visualização dos traços a serem contados.

Após a revelação química dos CR-39, os traços foram visualizados em microscópio óptico conectado a uma câmera de vídeo, ambos da marca Leica® e acoplados a um microcomputador. Foram realizadas 30 leituras de campo com aumento de 40 vezes por CR-39, sendo a contagem de traços por unidade de campo realizada pelo MATLAB®.

Os cálculos das concentrações de atividade do radônio foram realizados a partir da densidade de traços obtidos, descontada a radiação de fundo e o fator de calibração do sistema como mostra a Equação 1.

$$(1) CR_n = D/Kt$$

em que:

CR_n = concentração de Rn-222 (Bq m⁻³)

K = fator de calibração (traços cm⁻² por Bq m⁻³h⁻¹)

D = densidade de traços líquida (descontada a densidade relativa à radiação de fundo no detector) (traços cm⁻²)

T = tempo de exposição (h)

Para a análise da qualidade do procedimento analítico do sistema de detecção, foi realizada a



verificação entre a concentração de atividade medida por detector AlphaGuard e a quantidade de traços nos detectores CR-39 (SILVA *et al.*, 2017) na Câmara de Calibração RNI-CRCN. Detalhes da câmara de calibração podem ser consultados em Farias (2016). Para montagem do sistema de detecção, Silva *et al.* (2017) utilizou uma fonte de Ra-226 ($t_{1/2}=1.600$ anos) com atividade de 105 kBq, modelo PYLON RN-1025-100, Pylon Eletronics, Canadá, com taxa de produção constante de Rn-222.

Durante o experimento, o radionuclídeo foi arrastado da fonte de Ra-226 com fluxo constante de ar de $2,5 \text{ L min}^{-1}$ para a câmara, na qual foram colocados 10 detectores CR-39 em câmaras de difusão, sendo 2 utilizados como brancos analíticos. O experimento foi monitorado pelo detector de referência AlphaGUARD, que, a cada 10 minutos, mostrava o ar da câmara de calibração e realizava a medição da concentração de atividade de Rn-222. A amostra de ar analisada era devolvida para o interior da câmara, sendo a liberação do gás da câmara direcionada para um sistema de exaustão.

Após a exposição ao gás radônio, os detectores CR-39 passaram por revelação química para visualização dos traços formados pela interação das partículas α com o CR-39. Os traços foram visualizados em microscopia óptica com aumento de 40x para leitura de 30 campos por detector e a contagem de traços por campo utilizando-se o software MATLAB® (FARIAS, 2016; SILVA *et al.*, 2017).

Análise Estatística

Para a qualidade do procedimento analítico do sistema de detecção, foi realizada a verificação entre a concentração de atividade medida por detector AlphaGuard (de referência) e a quantidade de traços nos detectores CR-39 na Câmara de Calibração RNI-CRCN e verificação por meio do número E_n , no qual valores entre -1 e 1 foram indicativos de controle de qualidade ao nível de confiança de 95%. A análise estatística foi realizada usando Teste t de Student para médias independentes e estatística descritiva.

Resultados e discussão

Controle da qualidade do procedimento analítico

A verificação da qualidade analítica das medições ($n = 10$) de Rn-222 utilizando a câmara RNI-CRCN foi realizado por Silva *et al.* (2017) e os resultados da comparação entre os detectores de referência (AlphaGUARD) e o CR-39 estão descritos nesta seção. Os valores de concentração de atividade de Rn-222 medidos pelos detectores CR-39 apresentaram uma média de 4.798 Bq m^{-3} e um desvio padrão de 461 Bq m^{-3} . No entanto, o detector AlphaGuard, utilizado para avaliar os detectores CR-39, encontrou um valor médio de 5.012 Bq m^{-3} e um desvio de 589 Bq m^{-3} . Os valores de concentração de atividade de Rn-222 estiveram entre -2 e 2, dentro do intervalo adequado para o controle estatístico da qualidade em nível de 95% de confiança (FARIAS, 2016; SILVA *et al.*, 2017).

Concentração de atividade do Rn-222 em residências

As concentrações de atividade do Rn-222 *indoor* dos Municípios Abreu e Lima, Paulista e Olinda, verificadas durante as estações seca e chuvosa nos ambientes sala e quarto das residências, comparadas com os valores recomendados pela WHO, ICRP e EU estão apresentadas nas Figuras 3 e 4.

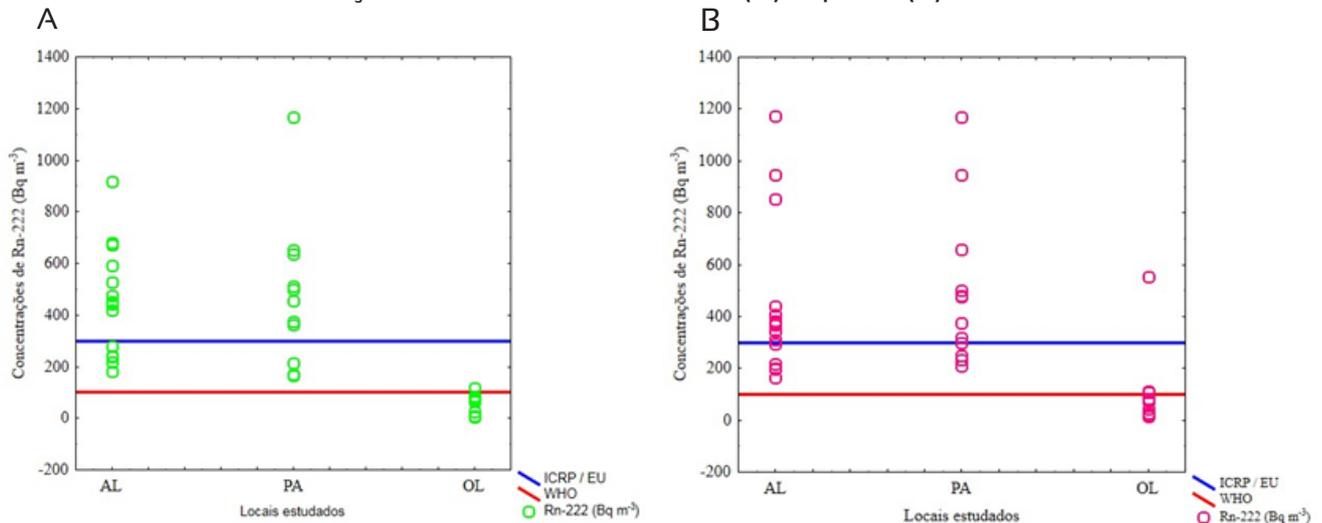
As concentrações de radônio *indoor* obtidas na estação seca dos municípios estudados para os ambientes sala e quarto foram em maior parte superiores aos valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde (100 Bq m^{-3}), Comissão Internacional de Proteção Radiológica e União Europeia (300 Bq m^{-3}), com exceção do Município Olinda que apresentou valores inferiores aos limites estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores, excetuando-se uma única residência, correspondente ao ponto de amostragem OLO9, localizado em Tabajara.

No Município Abreu e Lima durante a estação seca, as concentrações variaram de 166 a 1.174 Bq m^{-3} . Em determinados pontos de amostragem, as concentrações do gás se destacaram como no caso dos pontos ALO3, ALO7 e AL10, localizados no bairro Fosfato, em que as concentrações variaram de 311 Bq m^{-3} a 1.174 Bq m^{-3} . Em Caetés I, os pontos AL11 e AL15 apresentaram concentrações entre 166 Bq m^{-3} e 946 Bq m^{-3} e o ponto AL16, localizado no Bairro Timbó, com concentrações de



197 Bq m⁻³ e 671 Bq m⁻³.

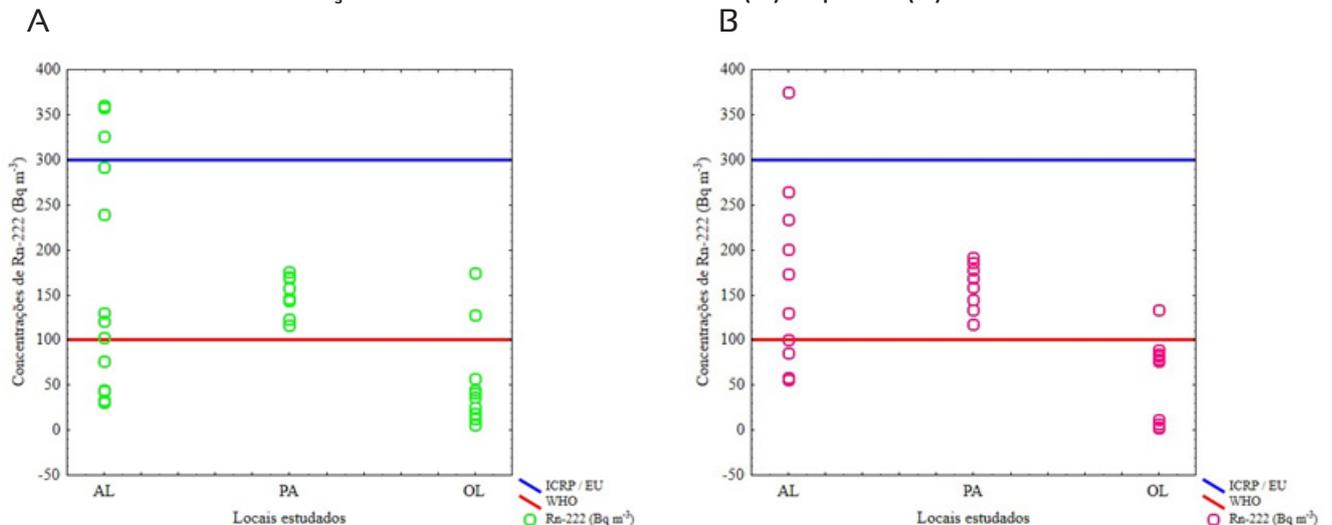
Figura 3 - Concentrações de atividade de Rn-222 determinadas nas residências estudadas na estação seca nos ambientes sala (A) e quarto (B).



AL= Abreu e Lima. PA= Paulista. OL= Olinda.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 - Concentrações de atividade de Rn-222 determinadas nas residências estudadas na estação chuvosa no ambiente sala (A) e quarto (B).



AL= Abreu e Lima. PA= Paulista. OL= Olinda.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o Município do Paulista, na estação seca, foram observadas concentrações do gás *indoor* que variaram de 170 a 1.170 Bq m⁻³, mostrando-se superiores aos valores recomendados pela WHO, ICRP e EU, com destaque para as concentrações encontradas nas residências localizadas nos seguintes pontos de amostragem, PA04, PA06 e PA08, no Bairro Paratibe, que apresentaram concentrações entre 375 e 1.170 Bq m⁻³. Também se destacaram os pontos PA10 e PA15, localizados nos Bairros Arthur I e Pau Amarelo, respectivamente, os quais apresentaram concentrações que variaram de 377 a 660 Bq m⁻³.

Para o Município de Olinda, foram encontradas concentrações de atividade de Rn-222 que variaram



de 2 a 553 Bq m⁻³ na estação seca. As medições do gás determinadas nas residências mantiveram-se entre os limites recomendados pela ICRP, EU e WHO, com exceção do ponto de amostragem OLO9 que atingiu concentração de atividade de 553 Bq m⁻³. Este ponto está localizado no Bairro Tabajara, o qual também apresentou concentrações elevadas de radônio na água de cacimba. As demais residências em Olinda monitoradas apresentaram valores considerados inferiores ao nível de referência recomendado pelos órgãos fiscalizadores.

Com relação à estação chuvosa (Figura 4), as concentrações determinadas em Abreu e Lima variaram de 31 a 375 Bq m⁻³, enquanto, em Paulista, a faixa de variação das concentrações foi 116 - 186 Bq m⁻³. Em Olinda, as concentrações de atividade medidas não demonstraram diferenças relevantes quanto as estações em nível de 95% de confiança (teste t para médias independentes = 0,06).

Quando comparadas as concentrações de atividade do gás *indoor* com relação as estações, foi observado que, na estação seca, as concentrações mostraram-se mais elevadas do que na chuvosa. Essa variabilidade pôde estar relacionada com fatores que influenciam na emissão do radônio, como o tamanho e a densidade dos grãos e umidade do solo, a qual reduz em 30 vezes a taxa de emissão quando o solo está saturado com água (RYZHAKOVA, 2014).

Magalhães et al. (2003) ao realizarem um estudo que verificou as concentrações de radônio dentro de residências em uma área urbanizada do Rio de Janeiro, observaram valores máximos na estação seca e valores mínimos na estação chuvosa. Ainda, segundo Magalhães et al.²⁰, foi observado que as áreas costeiras apresentaram os menores níveis do gás, o que talvez tenha influenciado as baixas concentrações de atividade encontradas nas áreas estudadas do Município de Olinda.

Estudos semelhantes a este também foram realizados em regiões de ocorrência uranífera em São Paulo, Minas Gerais e Paraná a fim de analisar as concentrações de atividade médias deste gás em habitações. No Estado de Minas Gerais, em Poços de Caldas, o valor médio encontrado em residências de área rural foi 220 Bq m⁻³ VEIGA et al., 2003), estando inferior aos valores mensurados em determinados pontos de amostragem dos Municípios Abreu e Lima e Paulista neste trabalho.

Com relação às concentrações de atividade de Rn-222 determinadas nos ambientes sala e quarto, segundo Yarmoshenko et al. (2016) a variação dessas concentrações pode estar atrelada à ventilação no local, em que janelas ou portas abertas contribuem para a minimização do acúmulo do gás.

No Município Abreu e Lima, os valores de concentração de Rn-222 da atmosfera *indoor* encontrados podem estar relacionados com os afloramentos de fosforito uranífero e à proximidade de um local de acumulação de rejeitos da antiga mineração de fosfato que ocorria nesta região (SOUZA, 2006). Também deve-se considerar o uso do material de construção pelos moradores, por influenciarem no aumento da taxa de exalação de Rn-222, sendo os tijolos vermelhos utilizados em algumas residências de Abreu e Lima, localizadas no Bairro do Fosfato, bons emissores de radônio (SAHOO et al., 2011, GIRAULT; PERRIER, 2012).

Entre os três municípios estudados, Olinda foi a cidade com menor risco quanto ao desenvolvimento de patologias relacionadas à inalação do radônio na atmosfera das casas, visto que suas concentrações se encontraram inferiores aos limites considerados de risco pelos principais órgãos de saúde e proteção radiológica. Porém, as concentrações do gás encontradas em Olinda não devem ser ignoradas, pois, de acordo com estudos epidemiológicos realizados na Europa, América do Norte e China, associando Rn-222 *indoor* ao câncer de pulmão, a maior parte dos casos registrados ocorreu após exposição a concentrações de atividade que variaram de baixas a moderadas, indicando que exposições em baixas concentrações também podem causar a neoplasia (EPA, 2016). Contudo, Abreu e Lima e Paulista se destacaram quanto aos valores medidos de concentração de atividade Rn-222, indicando risco para saúde da população local.

A variabilidade e a representatividade amostral são assuntos bastante relevantes para a monitoração de Rn-222 *indoor*. Por isso, foi calculado o n amostral indicado para realização do estudo, com valores de n= 3.148 residências para Abreu e Lima, n= 2.119 residências para Paulista e n= 3.655 residências para Olinda. Porém, os resultados apresentados foram os primeiros para RMR, tratando-se de um estudo piloto para análise das concentrações de Rn-222 na atmosfera das casas



em área específica de ocorrência uranífera.

O número de residências amostradas nesse estudo também esteve associado a disponibilidade de casas nas áreas consideradas como anômalas quanto a radiação de fundo e ao acesso autorizado pela população para colocação dos dosímetros. Ressaltando que a proteção radiológica possui como objetivo o bem do indivíduo, logo se um indivíduo morasse em uma área considerada anômala com relação a radiação natural, seria necessária uma monitoração contínua do gás.

Perfil da população e características das residências estudadas versus associação ao risco de desenvolvimento de câncer de pulmão relacionado a Rn-222

Com a aplicação de um instrumento de coleta de dados à população das áreas estudadas dos três municípios, Abreu e Lima, Paulista e Olinda, foi possível a obtenção de um perfil dos indivíduos com relação a exposição ao radônio *indoor* e as características das residências presentes nos locais avaliados. Na Figura 31, estão apresentados o tempo de moradia dos indivíduos das habitações estudadas.

De acordo com a Figura 31, o tempo de moradia dos indivíduos das residências estudadas em Abreu e Lima, Paulista e Olinda estão entre 5 meses e 40 anos, sendo a prevalência de período de moradia superior a 10 anos. Isto se tornou preocupante, visto que a exposição a radônio-222 *indoor* está principalmente relacionada com o tempo que o indivíduo fica suscetível ao radionuclídeo, aumentando, assim, a exposição conforme o tempo de moradia aumente.

Chen (2012) procurou analisar os efeitos da exposição ao gás em um período de 10 a 20 anos, nos Estados Unidos com base nos modelos de risco de exposição aos descendentes do radônio proposto pelo relatório do VI Comitê de estudo dos Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante (BEIR VI). O autor observou que os habitantes com idade média entre 30 e 50 anos possuíam elevado risco de câncer de pulmão quando exposto a radônio por vários anos, sendo essa faixa etária correspondente aos moradores das áreas estudadas dos municípios de Abreu e Lima, Paulista e Olinda.

Em um estudo realizado na Alemanha Oriental por Kreuzer et al. (2003) com a finalidade de associar câncer de pulmão a Rn-222, foram consideradas informações referentes ao tempo de moradia dos habitantes, hábitos de ventilação, tempo médio diário da permanência dos moradores na residência e nos principais cômodos como quarto e sala, além do tipo de piso do domicílio para análise do risco de desenvolver neoplasia de pulmão associado ao radônio. Essas características também foram consideradas neste estudo como mostra a Tabela I que demonstra as características das residências estudadas.

Tabela 1 – Percentual das características das residências estudadas dos Municípios Abreu e Lima, Paulista e Olinda.

Característica das residências	Residências dos municípios		
	Abreu e Lima (n=17)	Paulista (n=17)	Olinda (n=13)
Alvenaria sem revestimento	12%	24%	0%
Alvenaria com revestimento	88%	76%	100%
Suspensa	6%	0%	0%
Apoiada ao solo	94%	100%	100%
Semigeminada	0%	24%	
Não geminada	76%	6%	31%
Geminada	24%	71%	69%
Poço na propriedade	29%	29%	54%
Poço fora da propriedade	12%	12%	0%
Água encanada	59%	59%	46%
Piso revestido	94%	100%	100%
Piso de terra batida	6%	0%	0%

Fonte: Elaborada pelos autores.



Das residências avaliadas em Abreu e Lima, 88% eram de alvenaria com revestimento, sendo 12% de alvenaria sem o revestimento; 6% eram suspensas e 94% apoiadas ao solo; 24% eram geminadas com uma parede em comum com outra residência e 76% eram não geminadas; 12% possuíam poço fora da propriedade e 29% dentro e 59% continham água encanada. Quanto ao tipo de piso, 94% eram revestidos com cerâmica ou concreto/cimento ou azulejo, sendo 6% das residências de piso de terra batida. Além disso, 76% das casas continham apenas um banheiro e 20% tinham 2. Apenas 12% informaram a utilização de aparelho de ar-condicionado.

As residências de Paulista apresentaram um percentual de 76% com alvenaria com revestimento e 24% de alvenaria sem o revestimento e 100% das casas estudadas eram apoiadas ao solo; sendo 71% geminadas, 24% semigeminadas e 6% não geminadas; 29% apresentaram poço dentro da propriedade, 12% poço fora da propriedade e 59% continham água encanada. Com relação ao piso, 100% eram de revestidos com cerâmica ou azulejo. Além de 67% das casas possuírem 1 banheiro e 33% apresentarem 2 e 35% terem 1 ar-condicionado e 18% terem 2.

Em Olinda, as residências avaliadas foram 100% de alvenaria com revestimento e apoiada ao solo, em que 69% eram geminadas e 31%, não; 54% das casas apresentaram poço dentro da propriedade e 46% água encanada e 100% das residências possuíam piso revestido de cerâmica e/ou azulejo. As casas estudadas apresentaram também um percentual de 54% para 1 banheiro, 38% para 2 e 8% para 3; e 15% tinham 1 ar-condicionado e outros 15% tinham 2.

Bräuner et al. (2012) realizaram um estudo na Dinamarca sobre a diferença entre as concentrações de atividade de radônio dentro de residências isoladas ou próximas umas das outras, como por exemplo, em apartamentos. Os resultados encontrados mostraram que as casas com níveis de radônio superiores a 66 Bq m^{-3} , eram, em maior parte, isoladas, correspondendo a 83% das residências estudadas. Diferente dos resultados observados por Bräuner et al. (2012), a única casa suspensa (1º andar), localizada em Abreu e Lima, apresentou concentrações de radônio *indoor* entre 400 Bq m^{-3} e 860 Bq m^{-3} .

Bräuner et al. (2012) também avaliaram as razões de taxa de incidência (RTI) de câncer de pulmão associadas a concentração de radônio em residências suspensas e isoladas, encontrando valores maiores entre os indivíduos que vivem em casas isoladas. Para todos os participantes da pesquisa, a RTI encontrada foi 1,04 para cada aumento de 100 Bq m^{-3} na concentração do gás, porém, para os participantes residentes em casas isoladas a RTI foi 1,14, indicando que os moradores das casas isoladas dos municípios aqui estudados que apresentaram concentrações mais elevadas do gás *indoor*, como Abreu e Lima e Paulista, possuem maior risco de desenvolver esse tipo de neoplasia.

De acordo com Kreuzer et al. (2003), os níveis de concentração de atividade do gás são maiores em casas de piso de terra batida por não apresentarem nenhuma barreira, como revestimento que pode ser cerâmica, madeira e cimento, por exemplo, corroborando com a concentração de 382 Bq m^{-3} encontrada na residência deste estudo, localizada em Abreu e Lima de piso de terra batida.

Na Figura 32, estão comparadas as concentrações médias de atividade do Rn-222 encontradas nas residências estudadas de acordo com suas características. As residências estudadas em Abreu e Lima que possuíam piso revestido, parede de alvenaria com revestimento, não geminada e suspensa apresentaram concentrações médias de radônio de 300 Bq m^{-3} . As casas que possuíam piso de terra batida, parede de alvenaria sem revestimento, geminadas e janelas sempre fechadas apresentaram concentrações médias de 382 Bq m^{-3} , 320 Bq m^{-3} , 330 Bq m^{-3} e 350 Bq m^{-3} , respectivamente. As residências cujas janelas estavam sempre abertas apresentaram concentrações médias de 100 Bq m^{-3} .

Em Paulista, as residências com piso revestido e apoiadas sobre o solo apresentaram concentrações médias de 360 Bq m^{-3} . Casas com parede de alvenaria e revestidas e aquelas com uma certa frequência de abertura de janelas apresentaram valores de 300 Bq m^{-3} . As residências geminadas, com parede de alvenaria sem revestimento e que sempre deixam as janelas fechadas apresentaram valores médios de radônio de 430 Bq m^{-3} , 380 Bq m^{-3} e 450 Bq m^{-3} , respectivamente. As médias de concentrações de atividades foram menores para casas com janelas sempre abertas, alcançando 120 Bq m^{-3} , enquanto as semigeminadas e não geminadas mostraram valores de 190 Bq m^{-3} e 150 Bq m^{-3} , respectivamente.

Essas concentrações médias foram segregadas por municípios de acordo com as características



das residências estudadas para se obter uma ideia de como as variáveis (geminada, não geminada, apoiada ao solo, suspensa, janelas abertas ou fechadas, pisos e paredes revestidos ou não) poderiam influenciar no acúmulo do gás radônio *indoor*, porém observou-se que a quantidade do radionuclídeo dentro das residências, além das características mencionadas, esteve principalmente relacionada com a disponibilidade de urânio em superfície no material geológico em que se encontram as construções (UNSCEAR, 2008; FARIAS, 2016).

Para o Município de Olinda, as residências estudadas apresentaram valores médios de radônio de 70 Bq m⁻³ para as que possuíam piso revestido, parede de alvenaria com revestimento e apoiadas ao solo. Para as casas com as janelas sempre fechadas, foram encontradas concentrações de 74 Bq m⁻³ e, para aquelas com janela aberta, frequentemente de 15 Bq m⁻³. Para as casas não geminadas, foram obtidos valores médios de 108 Bq m⁻³ e para as geminadas de 60 Bq m⁻³.

Conclusão

A partir da determinação das concentrações de atividade de radônio-222 na matriz atmosférica em área de ocorrência uranífera da Região Metropolitana do Recife do Estado de Pernambuco, conclui-se que a realização deste estudo em nível local promove a melhoria das estimativas regionais de incidência de câncer de pulmão, permitindo definir e priorizar a proteção da saúde em determinadas áreas de ocorrência uranífera habitadas. Ao considerar que a proteção radiológica tem como objetivo a proteção de indivíduos e do coletivo, este trabalho proporcionou uma contribuição importante para que se conheça mais sobre esse radionuclídeo. Desse modo, radônio deve ser visto como um fator de risco que precisa de atenção, principalmente para áreas de ocorrências uraníferas. As concentrações de atividade de radônio-222 mensuradas nas residências dos Municípios Abreu e Lima, Paulista e Olinda sugerem forte contribuição para o surgimento de novos casos de câncer de pulmão. Considerando que a exposição ao radônio por um longo período está associada principalmente ao câncer de pulmão e que a população residente destes locais mora há mais de 10 anos, é essencial que sejam realizadas monitorações periódicas desse.

Referências

- AHN, G. H.; LEE, J. K. Construction of an environmental radon monitoring system using CR-39 nuclear track detectors. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 37, p. 395 - 400, 2005.
- ALI, M. Y. M.; HANAFIAH, M. M.; KHAN, M. F. Potential factors that impact the radon level and the prediction of ambient dose equivalent rates of indoor microenvironments. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1-10, 2018.
- AMARAL, D. S. **Radônio-222 e radionuclídeos associados em águas de poços e solos em áreas do fosforito uranífero da Região Metropolitana do Recife**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, p. 1 - 88, 2018.
- AMARAL, R. S.; VASCONCELOS, W. E.; BORGES, E.; SILVEIRA, S. V.; PACI, M. B. Intake of uranium and radium-226 due to food crops consumption in the phosphate region of Pernambuco – Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 82, p. 383 - 393, 2005.
- BURKE, Ó.; LONG, S.; MURPHY, P.; ORGANO, C.; FENTON, D.; COLGAN, P. A. Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis - a new model for indoor radon levels in Irish homes. **Journal of Radiological Protection**, v. 30, p. 433 – 443, 2010.
- CPRH. Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. **Diagnóstico Socioambiental - litoral norte**. O Meio Físico da Área, p. 33 – 42, 2015.



EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Assessment of radon in homes**. Disponível em: www.epa.gov/radiation/doc/assessment/402-r-03-003.pdf. Acesso em: 11 abr. 2022.

FARIAS, E. E. G. **Exalação de radônio-222 em solos: parâmetros para modelagem e métodos de determinação**. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, p. 1-126, 2016.

FARIAS, E. E. G.; SILVA NETO, P. C.; SOUZA, E. M.; FRANÇA, E. J. D.; HAZIN, C. A. Radon levels and transport parameters in Atlantic Forest soils. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 305, p. 811 – 815, 2015.

GIRAULT, F.; PERRIER, F. Estimating the importance of factors influencing the radon 222 flux from building walls. **Science of the Total Environment**, v. 433, p. 247 – 263, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 11 abr. 2022.

MAGALHÃES, M. H.; AMARAL, E. C. S.; SACHETT, I.; ROCHEDO, E. R. R. Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 67, p.131 – 43, 2003.

PETTA, R. A.; CAMPOS, T. F. C. O gás radônio e suas implicações para a saúde pública. **Revista de Geologia**, v. 26, p. 7 - 18, 2013.

RYZHAKOVA, N. K. A new method for estimating the coefficients of diffusion and emanation of radon in the soil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 135, p. 63 -66, 2014.

SAHOO, B.; SAPRA, B.; GAWARE, J.; KANSE, S.; MAYYA, Y. A model to predict radon exhalation from walls to indoor air based on the exhalation from building material samples. **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 2635 – 2641, 2011.

SILVA FILHO, C. A.; FRANÇA, E. J.; SOUZA, E. M.; RIBEIRO, C. A.; SANTOS, T. O.; FARIAS, E. E. G.; ARRUDA, G. N.; SOUZA NETO, J. A.; HONORATO, E. V.; HAZIN, C. A. Radioactive risk evaluation of mineral water in the Metropolitan Region of Recife, Northeastern Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 295, p.1215 -1220, 2013.

SILVA, K. E. M.; SILVA JÚNIOR, C. B.; SANTOS, M. L. O.; FRANÇA, E. J.; FARIAS, E. E. G. Modelo matemático para calibração de sistemas de detecção de radônio – 222. **Blucher Biophysics Proceedings**, v. 1, p. 98 – 100, 2017.

SOUZA, E. M. **Estratigrafia da sequência Clástica inferior (Andares comiciano-mastrichtiano inferior) da Bacia Paraíba e suas implicações paleo estratigráficas**. Tese de doutorado, UFPE-CTG, 2006. Disponível em: http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/id/29736896.html. Acesso em: 16/01/2023.

UNSCEAR - UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS. Report to General Assembly with Scientific annexes. **United Nations Sales Publications**, 2008. Disponível em: < <https://www.unscear.org/> >. Acesso em: 11 abr. 2022.

VEIGA, L. H. S.; KOIFMAN, S.; MELO, V. P.; AMARAL, E. C. S. Preliminary indoor radon risk assessment at the Poços de Caldas Plateau, MG – Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 70, p.



161 - 176, 2003.

VISHWAKARMA, G. Sample Size and Power Calculation. **Nursing Research in 21st Century**. 1. ed. Editores e distribuidores da CBS, 2017. cap. 17, p. 234-246.

YARMOSHENKO, I.; VASILYEV, A.; MALINOVSKY, G.; BOSSEW, P.; ŽUNIĆ, Z.; ONISCHENKO, A. Variance of indoor radon concentration: major influencing factors. **Science of the Total Environment**, v. 541, p.155 – 160, 2016.