



DOI: 10.5380/abclima

A INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA CONCENTRAÇÃO DO GÁS RADÔNIO NA ATMOSFERA BAIXA EM DUAS ÁREAS COM FITOFISIONOMIAS DISTINTAS NO PLANALTO DA BORBOREMA

*The influence of meteorological variables on the
concentration of radon gas in low atmosphere in two areas
with different phytophysionomies in the Borborema Planalt*

*La influencia de variables meteorológicas en la concentración
de gas radón en baja atmósfera en dos áreas con diferentes
fitofisionomía en la Meseta de Borborema*

Bruno César Dias de Albuquerque  

Instituto Federal do Piauí
bruno.albuquerque@ifpi.edu.br

Raquel Franco de Souza  


Universidade Federal do Rio Grande do Norte
raquel.franco@ufrn.br

Dayane da Silva Rodrigues de Souza  

Instituto Federal do Piauí
dayane.rodrigues@ifpi.edu.br

Vanessa de Almeida Dantas  

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
vanessalmeida24@gmail.com

Reinaldo Antônio Petta  

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
petta@ccet.ufrn.br

Resumo: O Radônio (^{222}Rn) é um gás radioativo, incolor e inodoro, sendo o mais pesado de todos os gases nobres de origem natural. As rochas e os solos com altas concentrações de Urânio e Tório são as

suas principais fontes. No Brasil, a maior parte das pesquisas a respeito desse gás está relacionada com estudos geológicos. Porém, os estudos são escassos na busca por esclarecer aspectos ainda pouco estudados, relacionados de forma geral à sua interação com outros fatores ambientais, como as variáveis meteorológicas. O objetivo deste trabalho é avaliar se variáveis micrometeorológicas podem explicar e/ou influenciar as concentrações de ^{222}Rn medidas em áreas de Arbustos Xerófitos (Caatinga) e de Floresta Tropical de Altitude, respectivamente nos municípios de Cuité e de Bananeiras, na Paraíba. A metodologia envolveu pesquisas bibliográficas, medições em campo e aplicação de modelos de regressão linear múltipla. O modelo foi aplicado nos dados das áreas de forma independente e com os dados agrupados, nos quais se obteve os melhores resultados de significância global. Concluiu-se que os parâmetros micrometeorológicos que mais possuem significância individual e que parecem mais influenciar os níveis do ^{222}Rn são a velocidade do vento (relação negativa) e a radiação solar (relação positiva).

Palavras-Chave: Variáveis micrometeorológicas. Radioatividade natural. Monitoramento. Regressão linear múltipla. Nordeste Brasileiro.

Abstract: Radon is a colorless and odorless radioactive gas and it is the heaviest of all noble gases of natural origin. Rocks and soils with high concentrations of Uranium and Thorium are the main sources of Radon. In Brazil most of the research is related to geological studies. However, there are few studies to clarify some less studied aspects related, in general, to its interaction with other environmental factors, for example, the meteorological variables. The aim of this work is to evaluate whether micrometeorological variables can explain and/or guide as coming from ^{222}Rn measured in areas of Xerophytic Shrubs (Caatinga) and Altitude Tropical Rainforest, respectively in the municipalities of Cuité and Bananeiras in the state of Paraíba. The methodology involved bibliographical research, field measurements and application of Multiple Linear Regression (MLR) models. The model was applied in the data of the areas independently, and with the data grouped where the best results of global significance were obtained. In conclusion, wind (negative) and Solar radiation (positive) were the meteorological parameters that most have individual significance and that seem to most influence the results of Radon.

Keywords: Micrometeorological Variables. Natural radioactivity. Monitoring. Multiple linear regression. Brazilian Northeast.

Resumen: El radón es un gas radiactivo incoloro e inodoro, es lo más pesado de todos los gases nobles de origen natural. Las rocas y los suelos con altas concentraciones de uranio y torio son las principales fuentes de radón. En Brasil, la mayor parte de la investigación está relacionada con estudios geológicos. Sin embargo, en la búsqueda de aclarar aspectos aún poco estudiados, relacionados en general con su interacción con otros elementos del entorno, como las variables meteorológicas. El objetivo de este trabajo es evaluar si las variables micrometeorológicas pueden explicar y/o influir en las concentraciones de ^{222}Rn medidas en áreas de Arbustos Xerófitos (Caatinga) y Bosque Tropical de Altitud, respectivamente en los municipios de Cuité y Bananeiras en Estado da Paraíba. La metodología involucró investigación bibliográfica, mediciones de campo y aplicación de modelos de Regresión Lineal Múltiple (RLM). El modelo se distribuyó en los datos de las áreas de forma independiente, y con los datos agrupados donde se obtuvieron los mejores resultados de significación global. En cuanto a los parámetros meteorológicos que tienen más importancia individual y que parecen influir más en los resultados del radón, se encuentran el viento (relación negativa) y la radiación solar (relación positiva).

Palabras Clave: Variables Micrometeorológicas. Radioactividad natural. Supervisión. Regresión Lineal Múltiple. Nordeste Brasileño.

Submetido em: 16/06/2020

Aceito para publicação em: 12/01/2022

Publicado em: 24/01/2022

INTRODUÇÃO

O Radônio (^{222}Rn) é um gás radioativo incolor, inodoro e é o mais pesado de todos os gases nobres de origem natural, compondo uma classe de gases quimicamente inertes e com baixa reatividade. Ele é formado principalmente pelo decaimento radioativo das pequenas quantidades de urânio que ocorrem naturalmente em todas as rochas e solos, o que faz com que possa ser encontrado em diferentes níveis em qualquer parte do planeta. Seu predecessor em termos de série radioativa, o Urânio 238, possui meia vida de 4,5 bilhões de anos. Dessa forma, estima-se que tal componente se encontra presente no solo desde a origem, de quando a Terra foi formada (BASKARAN, 2016; OMS, 2016; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1999).

Existem apenas três séries ou famílias radioativas naturais, conhecidas como Série do Urânio (^{238}U), Série do Actínio (^{235}U) e Série do Tório (^{232}Th). Nas três séries citadas, o processo de decaimento pode dar origem ao ^{222}Rn , porém, o que possui maior meia vida – e que será abordado no contexto desta pesquisa – é a série do ^{238}U mencionada anteriormente, na qual o ^{222}Rn tem meia vida de aproximadamente 3,8 dias, enquanto que o ^{219}Rn de 3,92 segundos e o ^{220}Rn de 54,5 segundos (REIS, 2016; CNEN, 2013).

A presença do ^{222}Rn estaria relacionada a fatores como a dinâmica dos ventos, a convecção e a difusão em vários fluxos por solos e rochas para a atmosfera, além de características do solo, como a permeabilidade e a porosidade (BASKARAN, 2016). Čujić *et al.* (2021) relacionam rochas como granitos, pegmatitos e gnaisses às altas concentrações de ^{222}Rn , e reforçam que a permeabilidade e a porosidade dos solos são fatores relevantes, pois quanto maior o fluxo de ar entre as camadas de solos e rochas, mais ^{222}Rn chegará até a superfície. Destaca-se ainda que, por se tratar de um gás solúvel, o contato de solos e rochas que contêm ^{222}Rn com a água pode ocasionar altas concentrações, principalmente quando se refere a águas subterrâneas, que estão em contato mais direto e confinadas entre solos e rochas (OTTON, 1992).

Quando um núcleo instável ou radioativo se desintegra, dando origem a outro elemento, partículas α (alfa) e β (beta) são emitidas e liberam uma grande quantidade de energia. Essas partículas, ao entrarem em contato com a matéria, podem ionizar átomos e moléculas, por isso recebem o nome de radiação ionizante (OTTON, 1992; BAIRD; CANN, 2011).



Frumkin e Samet (2001) ressaltam que as partículas alfa (α), que são emitidas pelo ^{222}Rn , mesmo energéticas, não percorrem longas distâncias no corpo e não penetram profundamente no tecido. Já Baird e Cann (2011) destacam que são partículas pesadas e, por isso, ao atingirem a matéria, perdem velocidade e acabam capturando elétrons, sendo convertidas em formas inofensivas. Entretanto, ao serem inaladas ou ingeridas, como no caso do ^{222}Rn , carregam energia suficiente para causar danos significativos ao DNA de núcleos celulares. Por essa questão, o ^{222}Rn teve muita atenção ao longo das últimas quatro décadas, em grande parte devido ao fato de ser uma expressiva fonte de radiação ionizante recebida pela população em geral e um potencial causador de neoplasias pulmonares (BASKARAN, 2016; OMS, 2016).

Além dos efeitos a saúde, existem diversas linhas de pesquisa envolvendo o ^{222}Rn . No contexto de variáveis meteorológicas, Moses *et al.* (1963) já buscavam estabelecer uma relação entre a concentração do ^{222}Rn e as variáveis meteorológicas por meio de medições e análise de gráficos em diferentes estações climáticas. Os autores mostraram, por exemplo, uma possível relação inversa entre o ^{222}Rn , a temperatura e a radiação solar, e que em condições de umidade, como no inverno, os valores de ^{222}Rn variavam bem menos.

Outkin *et al.* (2013) trabalharam com a hipótese de o gás ^{222}Rn ser utilizado como indicador de eventos sísmicos, baseado em estudos na famosa falha de San Andreas na Califórnia. Durante o monitoramento, ocorreram 25 abalos sísmicos de magnitude 4,5 a 5,8, sendo que os valores de ^{222}Rn se apresentaram anômalos antes dos eventos sísmicos.

Evrendilek *et al.* (2013) realizaram medições de ^{222}Rn na Turquia em turfeiras (organossolos) e florestas decíduas. Eles mostraram que os valores médios das áreas de turfeira foram de $15,8 \text{ Bq/m}^3$; já na floresta, de $5,1 \text{ Bq/m}^3$. Levin *et al.* (2002), em medições do ^{222}Rn em área de floresta de coníferas (Taiga) e na cidade de Heidelberg, na Alemanha, obtiveram valores maiores na cidade do que na floresta.

Jayaratne *et al.* (2011) propuseram, por meio de pesquisa nas florestas australianas e da análise de dados do ^{222}Rn de diversos estudos, uma possível relação entre a evapotranspiração das árvores e a difusão do ^{222}Rn do solo para a atmosfera. E Kumar *et al.* (2016) fizeram medições de ^{222}Rn e variáveis climáticas para analisar o comportamento diurno do gás em áreas rurais na Índia.

No Brasil, Dantas *et al.* (2020) analisaram 55 artigos publicados a partir de 2001. Assim, eles destacaram que a maior parte das pesquisas relacionadas à radiatividade natural acontece no âmbito de estudos geológicos e tem o Rádío como principal radionuclídeo citado. Os autores revelaram que a maior parte dos trabalhos apresentou em seus resultados valores acima das diretrizes internacionais.

Martens *et al.* (2004) demonstraram, em pesquisa realizada na floresta amazônica, a capacidade do ^{222}Rn de servir como marcador do transporte de CO_2 . Para além, Chaves *et al.* (2016) e Dantas *et al.* (2017) avaliaram a influência dos metais pesados e da radioatividade natural na água em duas cidades do semiárido brasileiro. Dantas *et al.* (2016) verificaram a influência de fatores climáticos sobre a quantidade de ^{222}Rn medido em áreas de mata atlântica e caatinga no Rio Grande do Norte. Já Alberigi e Pecequilo (2008) mediram os níveis de ^{222}Rn em um parque Estadual em São Paulo e constataram níveis elevados de ^{222}Rn principalmente no inverno, visto que há uma menor circulação de ar e menos correntes de convecção, bem como pela solubilidade do gás na água.

Marques, Geraldo e Santos (2006), na Serra de São Vicente, em São Paulo, encontraram níveis elevados de ^{222}Rn em fontes de água, em casas e nas cavidades das rochas. Os mesmos autores também compararam seus resultados com valores encontrados na literatura e sintetizaram que os níveis elevados de ^{222}Rn geralmente são encontrados no solo e nas cavernas. Por fim, Malanca, Repetti e Macêdo (1998) evidenciaram a presença de ^{222}Rn em águas subterrâneas em trabalhos realizados no Rio Grande do Norte.

De forma geral, esses exemplos de estudos abordando a radioatividade natural e o ^{222}Rn com diferentes enfoques confirmam que muita atenção é dada aos aspectos deletérios causados à saúde provocados pelo gás ^{222}Rn (HAHN *et al.*, 2015).

Otton (1992), em publicação do United States Geological Survey (USGS), menciona que algumas casas monitoradas em áreas com muito urânio no solo têm baixos níveis de ^{222}Rn interno, enquanto outras em solos pobres em urânio têm altos níveis de ^{222}Rn interno. Tal fato sugere claramente que outros fatores podem afetar a concentração do ^{222}Rn . Ressalta-se que ainda existem vários aspectos que carecem de discussão, como, por exemplo, os processos de difusão e a interação do ^{222}Rn com as partículas na atmosfera e as variáveis meteorológicas, o papel da vegetação e as diferenças de biomas, a influência do estágio de formação do solo,



dentre outros fatores que possam estabelecer uma relação mais precisa e preditiva com as variações desse gás no ambiente e os aportes, o transporte e os sinergismos do ^{222}Rn .

Nesse sentido, objetivo deste trabalho é avaliar se variáveis micrometeorológicas podem explicar e/ou influenciar as concentrações de ^{222}Rn medidas em áreas de Arbustos Xerófitos (Caatinga) e de Floresta Tropical de Altitude, localizadas respectivamente nos municípios de Cuité e de Bananeiras, ambos no Estado da Paraíba, por meio da aplicação de um modelo de regressão linear múltipla. A escolha das áreas foi motivada pela possibilidade de que as oscilações mais bruscas dos parâmetros micrometeorológicos medidos (visto se tratarem de áreas semiárida e semiúmida) ajudassem a explorar as interações associadas ao clima com as concentrações de ^{222}Rn na atmosfera.

MATERIAIS E MÉTODOS

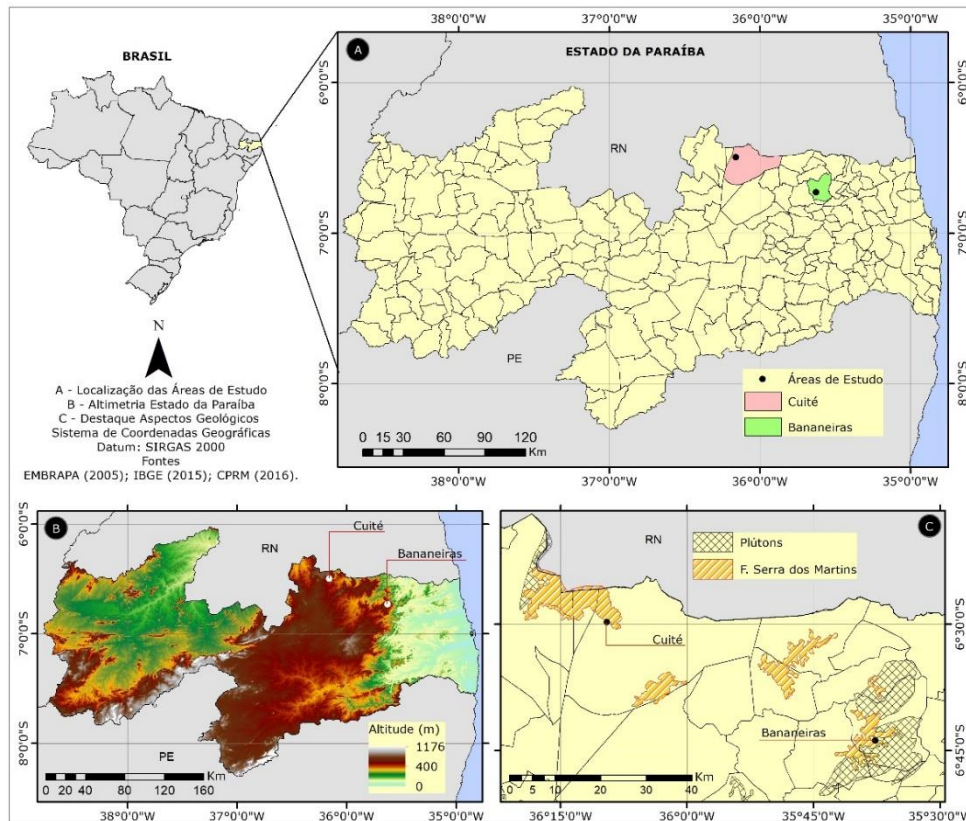
Os dados analisados foram produto de medições de campo que ocorreram entre os dias 06/04/2015 e 10/04/2015, no município de Bananeiras, e entre 16/04/2015 e 20/04/2015, no município de Cuité, ambos no interior da Paraíba, Nordeste do Brasil. As medições não foram restritas apenas ao período diurno, de modo a se ter um controle maior sobre as diferenças entre as concentrações de ^{222}Rn entre o dia e a noite. Cada parâmetro a ser medido prescinde de metodologia específica, a ser descrita.

Delimitação e Caracterização da Área De Estudo

O Planalto da Borborema, no Nordeste brasileiro, apresenta predominantemente clima semiárido. Todavia, algumas faixas mais próximas ao litoral se encontram inseridas em um microclima particular que combina áreas com resquícios de Mata Atlântica Nordestina, onde se registram a presença de árvores altas, sempre verdes, com áreas intercaladas de caatinga arbustiva. Tal área apresenta uma alta diversidade geomorfológica e geológica.

Foram escolhidas duas áreas para realização das etapas de campo (Figura 1 – A). A primeira área está no município de Bananeiras, localizado na mesorregião Agreste Paraibano e na Microrregião Brejo Paraibano. A segunda área escolhida está localizada no município de Cuité, na mesorregião Agreste Paraibano e na Microrregião Curimataú Ocidental (CPRM, 2005).

Figura 1 – A) Mapa de Localização das áreas de estudo; B) Mapa altimétrico do Estado da Paraíba, com a indicação das áreas de estudo; C) Destaque para as formações geológicas relevantes nas proximidades das áreas de estudo



Fonte: elaborado pelos autores (2021).

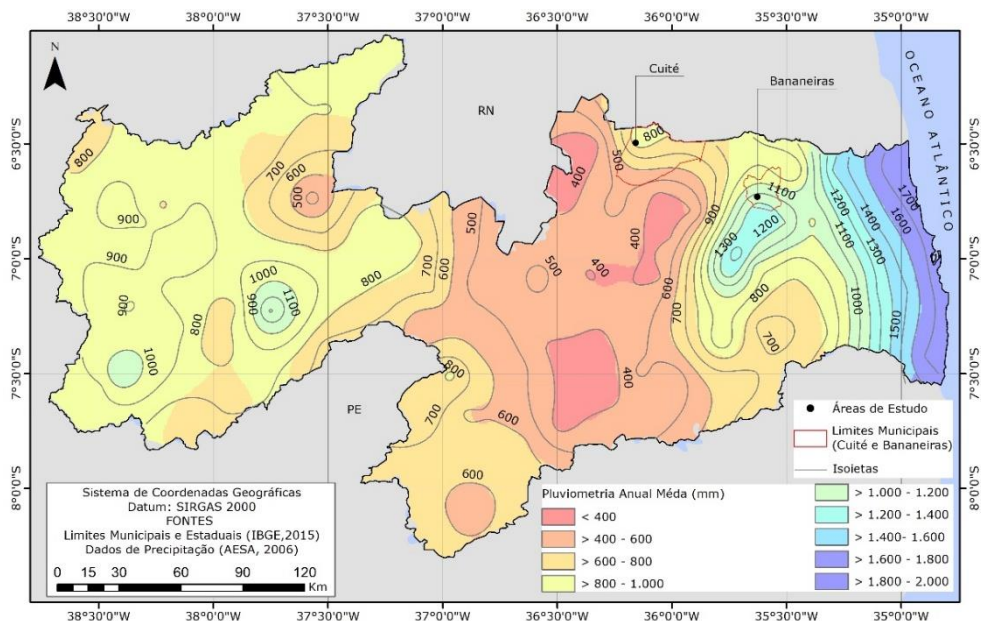
Reboita *et al.* (2016) destacam a importância do Planalto da Borborema no contexto regional tendo em vista a grande influência na dinâmica de ventos. Eles citam o exemplo da célula zonal de circulação de Walker (oeste-leste), mencionando que a massa de ar ascende pelo Leste e sofre a subsidência a Oeste, e esse processo provoca aumento de temperatura e diminuição da umidade. Os autores ainda afirmam que se não existisse o Planalto da Borborema, que são áreas com as maiores altitudes, o contexto climático seria mais homogêneo. Logo, as duas áreas de estudo estão situadas na área do Planalto da Borborema e situam em uma faixa de altitude entre 550-600m (Figura 1 – B).

As informações sobre a Geodiversidade são disponibilizadas por CPRM (2016), e as características geológicas constituíram um dos critérios para a escolha dos pontos para realização desta pesquisa. Assim como Cuité, Bananeiras também contempla uma formação sedimentar denominada de Serra de Martins, caracterizada principalmente pelas altas altitudes formadas por materiais sedimentares e ainda pela presença de rochas graníticas

(ígneas), denominadas plútons (Figura 1 – C). Segundo Morais Neto e Alkmim (2001), a formação Serra de Martins é constituída por remanescentes sedimentares preservados em altitudes elevadas no planalto da Borborema.

Nas duas áreas de estudo, o embasamento cristalino é constituído pelos terrenos gnáissico-graníticos da Província Borborema, recobertos por sedimentos terciários, arenito argiloso (MABESOONE, 1966; MORAIS NETO; ALKMIM, 2001). Esses materiais arenosos próximos à superfície são constituídos essencialmente por grãos de quartzo, mas podem apresentar-se placers (depósitos naturais), enriquecidos em minerais pesados (óxidos de ferro, allanita, granada, zircão, dentre outros). Desses minerais pesados destacam-se zircão, monazita e allanita, que podem conter até cerca de 6% de Urânio e Tório em sua estrutura cristalina, o que pode provocar anomalias radioativas relacionada tanto à radiação Gama quanto Alfa (MEDEIROS; TORRES; GOMES, 2000; FERREIRA; SANTOS, 2000).

Figura 2 – Mapa de pluviometria anual média do Estado da Paraíba, com destaque para as duas áreas de estudo



Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Uma característica peculiar de Bananeiras é a média pluviométrica entre 1400–1600mm (Figura 2), acima da média dos municípios próximos de altitude equivalente – em torno de 550-600m (Figura 1). Dessa maneira, percebe-se que as médias em Bananeiras equivalem às médias pluviométricas das cidades litorâneas (AESA, 2006). Já Cuité situa-se em uma faixa de 600-800mm. De acordo com o IBGE (2010), considerando dados de temperatura

e umidade, Cuité apresenta clima semiárido, e Bananeiras semiúmido. A Figura 2 evidencia as áreas com condições pluviométricas diferentes, como características mais áridas a oeste do Planalto da Borborema.

Buscou-se características geológicas específicas, bem como faixas de altitudes próximas (550-600m), para que a vegetação fosse um dos principais parâmetros de diferença entre os locais, com o objetivo de tentar entender a interação e a influência do tipo de vegetação (Figura 3) e/ou da densidade vegetal na concentração do ^{222}Rn na atmosfera e com os dados micrometeorológicos.

Figura 3 – A) Vista aberta da área de estudo em Bananeiras/PB; B) Vista aberta da área de estudo em Cuité/PB; C) Local de instalação dos instrumentos de medição em Bananeiras. Área em declive com vegetação arbórea, 20 metros atrás da casa utilizada como apoio (mostrada na imagem A); D) Local de instalação dos instrumentos de medição em Cuité, instalados em meio a vegetação arbustiva. Evidencia-se em todas as imagens as diferenças entre as características da vegetação, como sua coloração e densidade vegetal



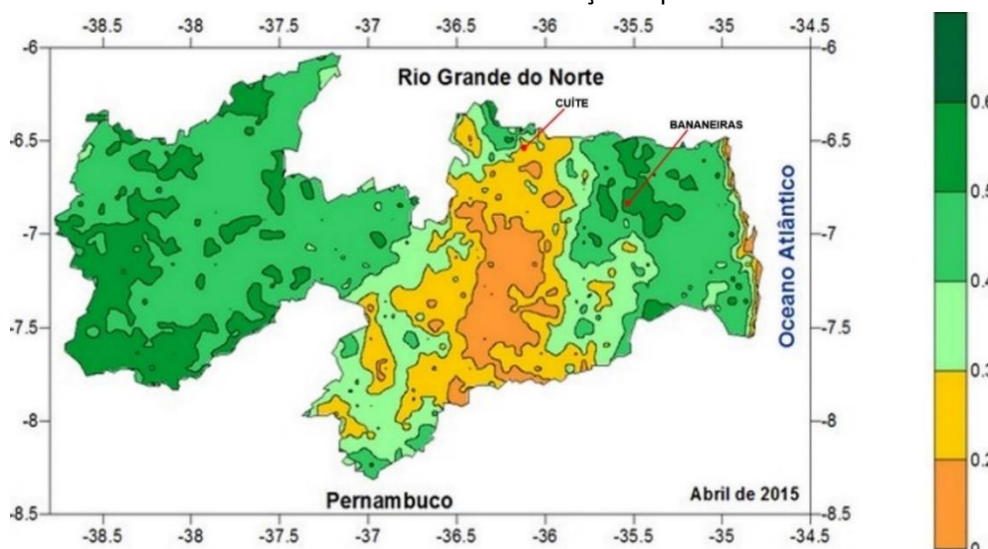
Fonte: elaborado pelos autores (2015).

De acordo com Fernandes (2007), a vegetação semicaducifolia apresenta perdas foliares de 10 a 60% durante os períodos de seca; e a caducifolia, perdas acima de 60% até a ausência total de folhas. Bananeiras apresenta vegetação predominante semicaducifolia, com fragmentos de Floresta Tropical de Altitude, associados com áreas de vegetação caducifolia nas áreas de transição de bioma. Já Cuité possui o predomínio de vegetação arbustiva com

característica xerófita, caducifólia, com aspecto característico da caatinga, apresentando mudanças bruscas entre o período de chuvas e de seca (CPRM, 2005).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) representa o estágio de desenvolvimento da vegetação de uma determinada região por meio de valores que variam de -1 a +1. A variação desse índice permite outras aplicações (além de representar o estágio de desenvolvimento da vegetação de uma determinada localidade), como, por exemplo, a identificação de áreas com solo exposto, vegetação morta e acompanhamento do desenvolvimento de culturas agrícolas (TUCKER, 1979). Nesse contexto, a Figura 4 mostra que o solo exposto, os corpos hídricos e as rochas apresentam valores próximos a zero (RIZZI, 2004). Pela análise da imagem, percebe-se também que Cuité está em uma faixa amarela, que vai de 0,2 a 0,3, enquanto Bananeiras encontra-se na faixa verde com valores entre 0,5 e 0,6. Em suma, Bananeiras possui valores mais expressivos de biomassa vegetal. Apesar de altitudes próximas, Cuité possui predominância de aspectos característicos da Caatinga, ao passo que Bananeiras é citada por autores como Vasconcelos Sobrinho (1970) como um brejo de altitude (de regiões altas) encravado no semiárido, com presença de Mata Atlântica e exposta a ventos úmidos.

Figura 4 – NDVI com base na combinação das refletâncias dos canais 1 e 2 dos sistemas de sensores AVHRR do satélite NOAA – 18 com resolução espacial de 4 Km x 4Km

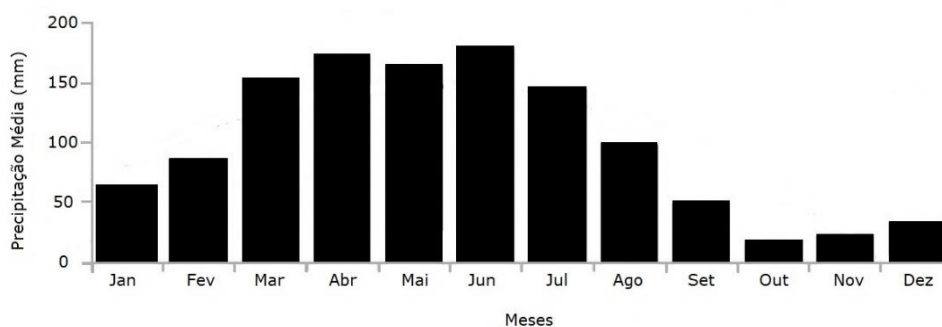


Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas UFCG (UNIVERSIDADE, 2019).

O período escolhido para a realização das medições considerou pesquisas realizadas por Medeiros *et al.* (2013), que analisaram a série histórica do município de Bananeiras de

1931 a 2010, possibilitando identificar os meses de maior e de menor ocorrência de chuvas. Tal informação foi ratificada por Chagas Neto e Araújo (2017), que analisaram 21 anos de dados da Microrregião Brejo Paraibano, concluindo que o período úmido vai de fevereiro a agosto e o período seco de setembro a janeiro. Em virtude disso, escolheu-se o mês de abril por se tratar de um dos meses de maior precipitação durante o período “chuvoso” (Figura 5). Assim é possível estabelecer um parâmetro de comparação quando for o caso de se realizar medições no período seco, inclusive considerando a vegetação que é completamente diferente.

Figura 5 – Gráfico da média pluviométrica histórica do município de Bananeiras/PB, para o período de 1931-2010



Fonte: adaptado de Medeiros *et al.* (2013).

Segundo dados da AESA (2015), o acumulado de chuva em abril (mês no qual foram realizadas as medições, como já explicitado) foi de 85,1 mm em Bananeiras e 37,9 mm em Cuité, valores abaixo da média histórica, mas que já mudam a paisagem em comparação com o período seco. Ainda de acordo com a agência, apenas em Bananeiras foi registrado 2,7 mm de chuva em um dos dias da pesquisa (09/04); contudo, isso não foi registrado no local onde os equipamentos estavam instalados.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As medições de campo ocorreram entre os dias 06/04/2015 e 10/04/2015 no município de Bananeiras, e entre 16/04/2015 e 20/04/2015 no município de Cuité, ambos no interior da Paraíba, Nordeste do Brasil. As medições, é válido reiterar, não foram restritas apenas ao horário diurno, de modo a se ter um controle maior sobre as diferenças entre as

concentrações de ^{222}Rn entre os períodos diel e noturno. Os equipamentos de medição foram instalados a um metro da superfície dos solos. Tentou-se fazer ciclos de até 4 dias de medições para simbolicamente contemplar um ciclo de meia vida do ^{222}Rn – que não passa de 4 dias (CNEN, 2013). Ressalta-se que esse intervalo é apenas uma referência, tendo em vista que alguns autores, como Kumar *et al.* (2016), por exemplo, fizeram análises do comportamento diurno do ^{222}Rn considerando o período de 24 horas. Já Moses *et al.* (1963) e Dantas *et al.* (2016) também consideram 4 dias de medições. Do ponto de vista do decaimento radioativo, não há como precisar a delimitação temporal de um ciclo de meia vida de nenhum elemento.

As medições das concentrações do ^{222}Rn e seus descendentes no ar foram feitas por meio de um medidor portátil modelo AlphaGuard[®], da Genitron, de forma passiva. O processo é feito por difusão através de um filtro de fibra de vidro. Em ambos os locais, o equipamento foi colocado a um metro da superfície do solo e no modo de fluxo contínuo do instrumento AlphaGuard (Figura 6).

Figura 6 – A) Local de medição do ^{222}Rn em Bananeiras/PB, fixado em uma árvore a altura de 1 metro do chão; B) Local de medição de ^{222}Rn em Cuité, fixado a 1 metro do chão por meio de cabo de aço



Fonte: elaborado pelos autores (2015).

Em relação à medição das condições atmosféricas, foram aferidos parâmetros como temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação solar, por meio de estação meteorológica portátil (modelo VANTAGE PRO 2 da DAVIS INC.), conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – A) Estação Meteorológica posicionada em Bananeiras/PB; B) Estação Meteorológica posicionada em Cuité/PB (B)



Fonte: elaborado pelos autores (2015).

Os valores de ^{222}Rn e os dados micrometeorológicos (denominados assim de acordo com a escala de tempo em que foram aferidos) foram medidos na mesma escala de tempo, com horários semelhantes e intervalos de 10 minutos entre uma medição e outra, de forma a obter correspondência nas observações. Isso foi realizado com o objetivo de testar se as variáveis micrometeorológicas poderiam de alguma forma explicar os valores de ^{222}Rn , ou, ao menos, se apresentariam alguma significância estatística. Por serem variáveis diversas, a escolha do método estatístico foi baseada em Greene (2002) e Wooldrige (2016), além de trabalho publicado por Dantas *et al.* (2016). Dessa forma, optou-se por criar um modelo de regressão linear múltipla, considerando o comportamento da variável dependente Radônio na relação entre as variáveis independentes (temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento).

A escolha das variáveis micrometeorológicas considerou os parâmetros utilizados por Dantas *et al.* (2016) e Moses *et al.* (1963). Não obstante, é relevante ressaltar que as pesquisas de Kumar *et al.* (2016) e Jayaratne *et al.* (2011) foram também importantes, pois, apesar de trabalharem outros aspectos, em comum também discutiram sobre relação do ^{222}Rn com temperatura e umidade.



Tratamento Estatístico dos Dados

Os dados foram organizados em arquivo no formato Excel (*.xlsx) e importados para os programas Stata 13.0, da StataCorp LLC, e SPSS Statistics, da IBM, em que foram feitos todos os processos necessários para a análise.

Na tentativa de compreender se as diferenças e os valores obtidos por meio das medições de campo eram matemática e estatisticamente relevantes, foi realizado um teste *t* de Welch para as duas amostras de forma independente (Bananeiras e Cuité). O teste *t* de Welch busca comparar as médias das variáveis dos dois grupos, a fim de que hipóteses sejam testadas e que se tenha uma resposta sobre se há ou não diferença estatisticamente significativa entre as médias das duas amostras (WELCH, 1947; DELACRE; LAKENS; LEYS, 2017). Para atender aos pressupostos e poder realizar o teste *t* de Welch, como o teste *t* de Welch, diferentemente do teste *t* de Student, é robusto a heterocedasticidade, ele requer apenas os pressupostos da normalidade dos dados e da independência das observações. Dessa forma, realizou-se dois testes de normalidade: o Kolmogorov-Smirnov e o Shapiro-Wilk. Diante da não normalidade dos dados, foi aplicado um processo de *bootstrapping*, que realiza diversas reamostragens (1000 reamostragens; 95% IC BCa), para correção de desvios de normalidade da distribuição das amostras, resultando em uma maior confiabilidade dos resultados (HAUKOOS; LEWIS, 2005).

Destarte, foi aplicado o método de regressão linear múltipla com o objetivo de investigar em que medida as variáveis micrometeorológicas (temperatura, vento, umidade e radiação solar) explicavam os níveis de ^{222}Rn no ambiente. Como os dados analisados não atenderam ao pressuposto da homoscedasticidade, foi utilizada a opção “*r*” (robust) durante a estimação do modelo, pois ela considera erros padrão que tornam os estimadores da regressão robustos à heterocedasticidade. Os modelos foram estimados para as duas amostras (Bananeiras e Cuité) de forma individualizada e agregada (Bananeiras + Cuité). Nesse contexto é importante ressaltar que, como existiam muitos valores zerados (principalmente nas variáveis velocidade do vento e radiação solar), trabalhar com dados em logaritmo para tentar “suavizar” as diferenças ficou inviável. Isto posto, optou-se por rodar os dados em nível.

Os parâmetros das variáveis independentes foram estimados pelo método de mínimo quadrado ordinário, através da estimação da equação por regressão linear múltipla segundo o modelo de equação (WOOLDRIGE, 2016):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \text{ (Eq 1.)}$$

Onde:

$$\text{Radônio} = \beta_0 + \beta_1 \text{Temp} + \beta_2 \text{Umi} + \beta_3 \text{Vento} + \beta_4 \text{Rad.solar} + \varepsilon$$

Em que Y é a variável dependente Radônio (Bq/m³); β_0 corresponde a um coeficiente fixo; β_1 Temp refere-se a medida de temperatura (°C), β_2 Umi indica a umidade (%), β_3 Vento refere-se a velocidade do vento (m/s), β_4 Rad.solar é a radiação solar (w/m²); e ε é o erro aleatório.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ²²²Rn, principal parâmetro desta pesquisa, em ambos os casos foi medido pelo período de 4 dias completos, ou seja, por 96 horas sem interrupções. No caso específico de Bananeiras, os dados de ²²²Rn serão descritos e comparados considerando os 4 dias. Todavia, as análises e os testes estatísticos de regressão linear múltipla com as variáveis micrometeorológicas consideram 3 dias completos em Bananeiras e 4 dias completos em Cuité, devido a um problema técnico ocorrido no registro dos dados meteorológicos no último dia de medições em Bananeiras. Uma vez que não havia sentido em fazer a análise e os testes de regressão apenas com os dados de ²²²Rn sem a correspondência horária dos demais dados, mesmo com número de observações diferentes, se considerou não haver prejuízo na análise, pois tal fator não teria relevância em relação ao decaimento. No aspecto de relação com as variáveis micrometeorológicas, manteve-se a correspondência dos dados, e os modelos de regressão foram aplicados de diferentes formas a serem descritas.

Observou-se que os valores de ²²²Rn em Bananeiras foram maiores do que os da série de medições em Cuité. Em Bananeiras, a média foi de 7,72 Bq/m³, com valores variando de 0 a 26,75 Bq/m³. Já em Cuité, a média foi de 6,20 Bq/m³ com valores variando de 0 a 21,38 Bq/m³ (Tabela 1).

Tabela 1 – Síntese da estatística descritiva nos ciclos de medições de 4 dias nas áreas de estudo

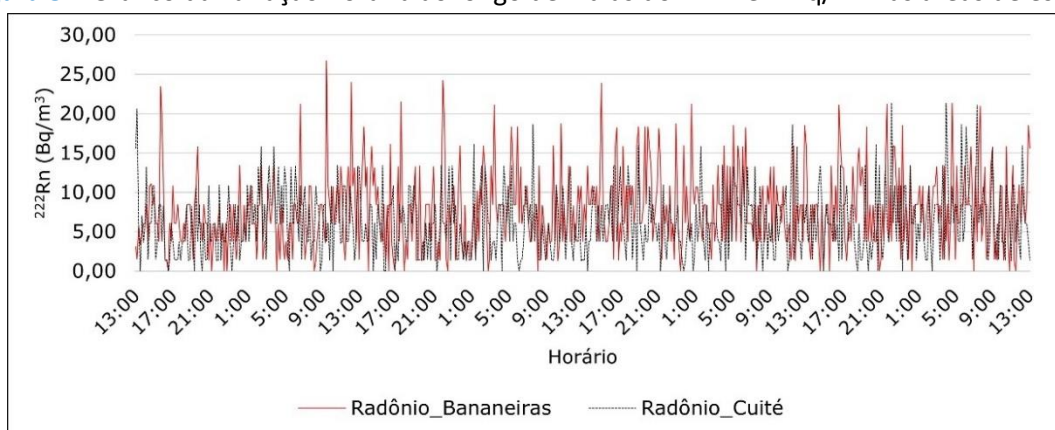
Local	Média (Bq/m ³)	Desvio padrão	Mín	Máx
Bananeiras	7,72	4,979	0,0000	26,75
Cuité	6,20	4,222	0,0000	21,38

Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Dada a característica de solubilidade em água do ²²²Rn, é importante ressaltar que, apesar das áreas terem atingido altos níveis de umidade (Tabela 2), nos períodos amostrados não houve ocorrência significativa de precipitação. Os valores são maiores do que os aferidos por Dantas *et al.* (2016), que utilizaram a mesma metodologia e obtiveram 5,15 Bq/m³ de média com valores que variaram de 0,52 a 13,65 Bq/m³. Como comparação, a pesquisa de Kumar *et al.* (2016) em áreas de campo na Índia mediu valores com variação de 2 a 65 Bq/m³. Evrendilek *et al.* (2013) em ambiente de floresta obtiveram médias menores de 5,1 Bq/m³, enquanto que em áreas de solos ricos em turfa as médias foram maiores de 15,8 Bq/m³.

A Figura 8 mostra a variação do ²²²Rn em escala horária ao longo dos 4 dias de medição em Cuité e em Bananeiras. Mesmo com o perfil oscilante, pode-se perceber que os dados de Bananeiras possuem maior instabilidade (maior desvio padrão) e variação entre valores mínimos e máximos. Se analisarmos, por exemplo, os maiores valores amostrados em cada área, a maior parte encontrava-se fora da faixa de 09h às 16h, intervalo em que se tem maior temperatura. Kumar *et al.* (2016) mencionaram que os picos de concentração ocorriam nas primeiras horas da manhã, geralmente entre 06h e 08h30 e diminuía após o nascer do sol, atingindo mínimos durante a tarde: 14h-16h. Evrendilek *et al.* (2013) destacaram em seus resultados que a variabilidade temporal nas concentrações do ²²²Rn aumentou no período noturno, particularmente das 21h às 01h e diminuiu no período diurno das 13h às 17h. Moses *et al.* (1963) apontaram que, no período seco, a amplitude diurna da concentração de ²²²Rn é alta, com valores mais altos ocorrendo logo antes do nascer do sol. Os autores atribuem essa oscilação ao fato de a radiação mudar as condições de estabilidade das camadas na superfície em função do fluxo vertical provocado pelo aquecimento pelo sol.

Figura 8 – Gráfico da variação horária ao longo de 4 dias do ^{222}Rn em Bq/m^3 nas áreas de estudo



Fonte: elaborado pelos autores (2021).

De maneira geral, esses números são baixos em relação ao que a literatura versa sobre riscos à saúde humana. Entretanto, alguns picos ultrapassam o valor que a OMS (2016) estabelece como o nível médio ao ar livre, que é entre 5 e 15 Bq/m^3 .

A OMS também propõe um nível de referência de 100 Bq/m^3 para intervenção e medidas para minimizar os riscos à saúde devido à exposição ao ^{222}Rn . Os valores mais altos em Bananeiras e em Cuité ficaram acima de 20 Bq/m^3 – o que, de acordo com a Public Health England (PHE), é o valor médio das residências do Reino Unido. Já a Environmental Protection Agency (EPA-US) estabelece o nível de ação de 148 Bq/m^3 , mas recomenda há anos que os proprietários também considerem a mitigação quando o nível de ^{222}Rn estiver a partir de 74 Bq/m^3 .

Esta pesquisa não aferiu valores próximos aos citados como de intervenção – os quais, apesar de focarem em ambientes internos, servem de referência de forma geral. Ressalta-se que as medidas foram feitas ao ar livre; portanto, não se pode afirmar se no interior de residências, em casos de ausência de ventilação, o ^{222}Rn poderia se concentrar e atingir esses valores considerados de intervenção.

Em relação aos dados meteorológicos, por meio da estatística descritiva deles, é possível perceber que, embora os valores médios de ^{222}Rn sejam próximos, as variáveis micrometeorológicas apresentam diferenças e variações mais significativas.

Das variáveis aferidas, como já foi citado, uma das que apresentam grande importância para a dispersão e/ou a concentração do ^{222}Rn é a velocidade do vento ou, pode-se dizer, a sua ocorrência. Nesse aspecto, quando comparamos as duas áreas, percebe-se que existem uma diferença considerável: em Bananeiras, praticamente não houve ocorrência de ventos, o



relevo e a vegetação fechada podem ter influenciado a pouca variação, os valores médios ficaram sempre perto de 0,00 (zero), e variaram no máximo até 0,40 m/s (Tabela 2); já em Cuité, a dinâmica dos ventos foi bastante diferente, principalmente na amplitude de variação, ocorrendo valores de 0,00 a 3,10 com média de 1,62 m/s. Como pode ser evidenciado na Figura 9, Bananeiras possui um perfil mais estável nos primeiros dias com alguns picos no meio da manhã/início da tarde. Dantas *et al.* (2016), em ambiente de Mata Atlântica, encontraram perfil de variação similar ao de Bananeiras. Em Cuité, a maior ocorrência de ventos se deu no final da tarde, o que difere dos outros dados amostrados. Provavelmente, por se tratar de uma região com menor umidade, as mudanças de temperatura mais bruscas (que ocasionam movimento vertical de massas de ar) tendem a ocorrer após a diminuição da radiação solar. Moses *et al.* (1963) já evidenciavam o efeito do aumento da velocidade do vento na diminuição das concentrações de ^{222}Rn , e os estudos posteriores reforçaram essa influência do efeito dispersivo do vento. A OMS e as agências ambientais que monitoram o ^{222}Rn , por exemplo, recomendam como principal mitigação em relação às altas concentrações do gás o aumento da ventilação dos ambientes.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos dados meteorológicos de Bananeiras/PB e de Cuité/PB

	Média		Desvio padrão		Mínimo		Máximo	
	Ban*	Cuité	Ban*	Cuité	Ban*	Cuité	Ban*	Cuité
Temp (°C)	24,03	25,10	2,03	3,92	21,40	19,20	30,10	33,00
Umi (%)	89,52	71,97	7,70	19,20	61,00	33,00	98,00	97,00
Vento (m/s)	0,14	1,62	0,19	0,54	0,00	0,00	0,40	3,10
Rad. Solar (w/m ²)	19,62	54,11	29,08	83,32	0,00	0,00	122,00	724,00

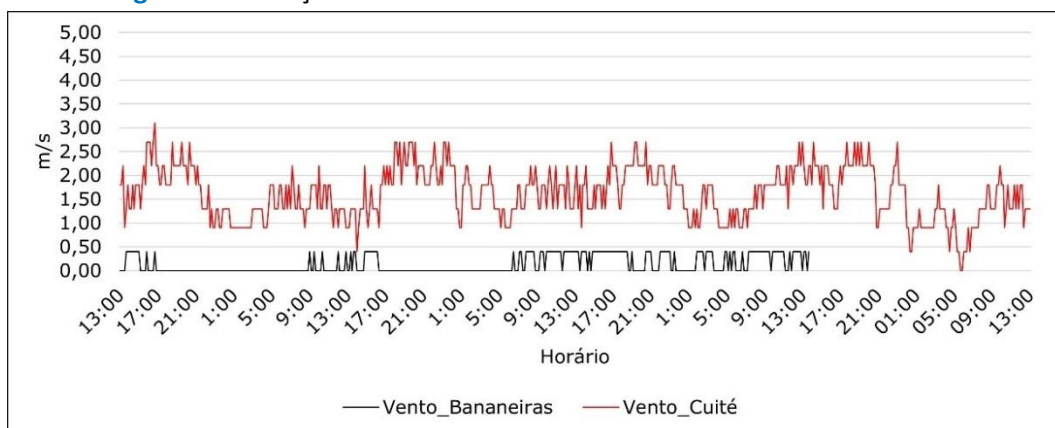
*Bananeiras

Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Apesar dos valores médios próximos de temperatura (Tabela 2), os perfis de variação foram bem diferentes entres as áreas (Figura 10). No caso de Bananeiras, a temperatura variou de 21,40 a 30,10°C, com média em torno de 24,03°C; já em Cuité, a mínima foi de 19,20

e a máxima de 33,00°C, com média de 25,10°C, o que exemplifica mais uma vez que as condições atmosféricas em Cuité variaram bem mais e apresentaram um perfil mais instável do que em Bananeiras, o que é típico de regiões semiáridas (Figura 10).

Figura 9 – Variação horária da velocidade do vento nas áreas de estudo

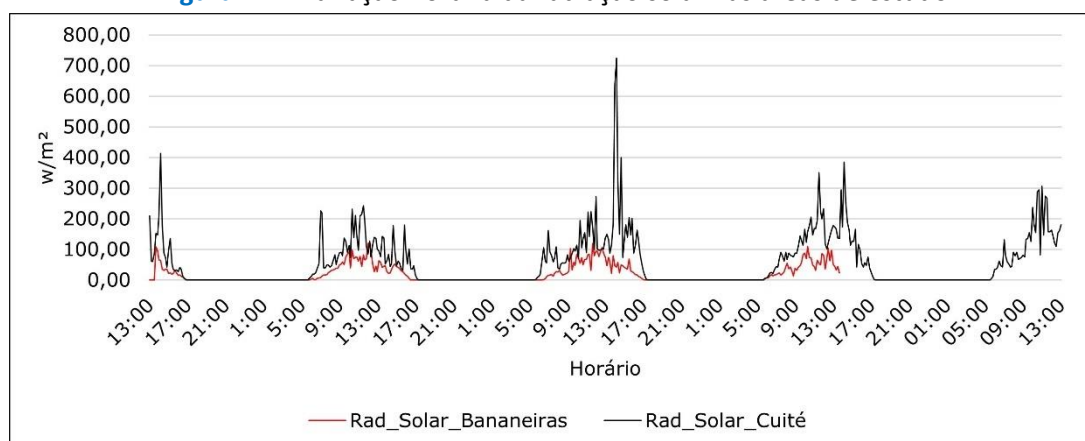


Fonte: elaborado pelos autores (2021).

A umidade relativa do ar, como esperado, apresentou condição inversamente proporcional à temperatura, como pode ser visto claramente na Figura 10. Em ambos os casos, quanto maior a temperatura, menor a umidade relativa do ar. Logo, verifica-se que a variação diurna tem relação direta com a radiação solar.

Em Bananeiras, as condições mostraram-se mais estáveis: a umidade variou de 61 a 98%, com média de 89,52% – valores bem altos. Em Cuité, a média foi de 71,97%, com uma expressiva variação de 33 a 97%, o que reflete oscilações condizentes com regiões semiáridas. Apesar dos valores máximos bastante altos, 98 e 97%, nas duas áreas não foi registrada ocorrência de chuvas pelas estações portáteis no período amostrado. Essa ausência de precipitação evita a interferência direta da chuva nos resultados, visto a solubilização do gás e a permeabilidade do solo que dificulta a difusão do gás (MOSES *et al.*, 1963; KUMAR *et al.*, 2016).

Figura 11 – Variação horária da radiação solar nas áreas de estudo



Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Análise Estatística dos Dados

Os dados referentes as variáveis medidas nas duas áreas de estudo, Bananeiras e Cuité, demonstraram características micrometeorológicas (média e desvio padrão) visivelmente diferentes. A fim de compreender se as diferenças de concentração desses elementos nos territórios estudados eram matemática e estatisticamente relevantes, foi realizado um teste *t* de Welch, aplicado para comparar as médias das variáveis de dois grupos independentes. Desse modo, ele testa a hipótese nula ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) de que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias das duas amostras. Caso essa hipótese seja rejeitada, podemos aceitar a hipótese alternativa ($H_1: \mu_1 \neq \mu_2$) de que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das variáveis das duas amostras de forma independente (WELCH, 1947; DELACRE; LAKENS; LEYS, 2017).

Realizou-se dois testes de normalidade, o Kolmogorov-Smirnov e o Shapiro-Wilk, e verificou-se que os dados não possuíam a normalidade requerida pelo teste – ver a Tabela 3. Entretanto, para a realização do teste *t* foi aplicado um processo de *bootstrapping*, que realiza diversas reamostragens (1000 reamostragens; 95% IC BCa) para se obter uma maior confiabilidade dos resultados, corrigindo os desvios de normalidade da distribuição da amostra e as diferenças entre os tamanhos dos grupos, bem como para apresentar um intervalo de confiança de 95% para as diferenças entre as médias (HAUKOOS; LEWIS, 2005).

Tabela 3 – Testes de normalidade aplicados aos dados medidos

		Tests of normality					
		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estatística	df	Sig.	Estatística	df	Sig.
²²²Rn	Ban.	.147	433	.000	.950	433	.000
	Cuité	.150	577	.000	.937	577	.000
	Agregado	.135	1010	.000	.940	1010	.000
Temp	Ban.	.160	433	.000	.901	433	.000
	Cuité	.132	577	.000	.905	577	.000
	Agregado	.139	1010	.000	.921	1010	.000
Umi	Ban.	.203	433	.000	.845	433	.000
	Cuité	.163	577	.000	.883	577	.000
	Agregado	.160	1010	.000	.834	1010	.000
Vento	Ban.	.421	433	.000	.600	433	.000
	Cuité	.187	577	.000	.934	577	.000
	Agregado	.195	1010	.000	.885	1010	.000
Rad solar	Ban.	.302	433	.000	.724	433	.000
	Cuité	.258	577	.000	.690	577	.000
	Agregado	.281	1010	.000	.631	1010	.000

Fonte: elaborado pelos autores (2021).

O teste de Levene também foi realizado para verificar o pressuposto de homogeneidade das variâncias. Foi verificado que os dados não são homocedásticos e portanto utilizou-se o teste *t* de Welch, que é robusto para heterocedasticidade (WELCH, 1947; DELACRE; LAKENS; LEYS, 2017).

Com os pressupostos para a validação do teste acatados, o teste *t* de Welch foi realizado e segue apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Estatística após aplicação do teste *t* de Welch

		Escore		Estatística do teste <i>t</i> (<i>Bootstrapping sample</i>)				
		M	DP	<i>t</i>	<i>GI</i>	Valor P	Diferença de médias	d-Cohen
Radônio	Ban.	7,72	4,98	5.92	1008	.001	1.77078	0.38
	Cuité	6.20	4.22					
Temp	Ban.	24.03	2.03	-5.61	1008	.001	-1.0681	1.21
	Cuité	25.10	3.92					
Umi	Ban.	89.52	7.70	19.9	1008	.001	17.543	1.14
	Cuité	71.97	19.20					
Vento	Ban.	0.14	0.19	-61.19	1008	.001	-1.4795	3.53
	Cuité	1.62	0.54					
Rad solar	Ban.	19.62	29.08	-9.22	1008	.001	-34.494	0.59
	Cuité	54.11	83.32					

Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Observa-se que todas as variáveis têm médias estatisticamente diferentes nos dois lugares analisados (Tabela 4). Entretanto, ao verificar o tamanho de efeito da diferença da variável do Radônio – ^{222}Rn (que nas análises posteriores será a variável dependente), constata-se que ele foi pequeno (*d* de Cohen = 0,38), enquanto o efeito das diferenças das variáveis temperatura, umidade e vento (variáveis independentes) foram muito altos (Tabela 4). Isso indica que, embora as variáveis micrometeorológicas sejam bem diferentes nos dois lugares, o nível de radônio não se diferencia na mesma proporção (Tabela 1).

O *d* de Cohen é uma medida usada para verificar a intensidade das diferenças entre duas médias. Tal parâmetro informa quantos desvios padrão (DP) de diferença existem entre os resultados dos dois grupos de comparação, além de ser útil para avaliar a significância prática das diferenças (COHEN, 2013). Normalmente, interpreta-se uma mediada *d* de Cohen >0.40 como um efeito pequeno, enquanto um resultado de *d* de Cohen >0.80 representa um efeito alto.

Modelo de Regressão Linear Múltipla

Foi realizada uma análise de regressão linear múltipla com o objetivo de investigar em que medida os valores das variáveis micrometeorológicas (temperatura, vento, umidade e

radiação solar) explicavam as concentrações de radônio nas áreas de estudo. Os modelos foram estimados para as duas amostras (Bananeiras e Cuité) de forma individualizada e também com os dados das duas áreas agregados, conforme apresentado na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Resultados da aplicação dos modelos de regressão linear para Bananeiras e Cuité, e com os dados das duas áreas agregados

Variáveis	Bananeiras	Cuité	Dados agregados
Temp	-0.848* (0.491)	0.0450 (0.248)	-0.0876 (0.144)
Umi	-0.223* (0.121)	0.0352 (0.0506)	0.00283 (0.0302)
Vento	-0.633 (1.448)	-0.944*** (0.322)	-1.172*** (0.244)
Rad solar	-0.00531 (0.0134)	0.00867*** (0.00255)	0.00676*** (0.00258)
Constant	48.53** (22.24)	3.599 (9.801)	9.782 (6.016)
Observations	433	577	1,010
R-squared	0.011	0.036	0.050
RMSE	5.02	4.16	4.55
F	F(4, 428) = 1.47	F(4, 572) = 5.63	F(4, 1005) = 14.78

Robust standard errors in parentheses *** p<0.01, ** p<0.05, *p<0.1

Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Os resultados demonstram que as variáveis independentes conjuntamente não são capazes de entregar um alto nível de explicação para a variável radônio. Contudo, observa-se que algumas variáveis individualmente (vento e rad solar) apresentam uma influência estatisticamente significativa sobre as concentrações de ^{222}Rn . Verificou-se também que o modelo com melhor poder explicativo é o que agrega as duas amostras (Bananeiras e Cuité), com o total de 1010 observações, considerando a variável dependente (Radônio) na relação entre as variáveis independentes – no caso, temperatura (Temp), umidade (Umi), velocidade do vento (Vento) e radiação solar (Rad solar)

O modelo dos dados agregados apresentou $R^2=0.05$, e teste F (4, 1005) = 14.78, RMSE=4.55. Apesar do R^2 ser considerado pequeno, é importante destacar que essa análise

não visa prever precisamente as concentrações de ^{222}Rn , e sim compreender como as variáveis independentes colaboram para a explicação das concentrações do gás. Dessa forma, independentemente do R-quadrado, os coeficientes significativos ainda representam a mudança média na resposta para uma unidade de mudança na variável independente, quando se mantem as outras constantes. Esse tipo de informação para esta pesquisa é extremamente importante e por isso foi considerada.

Destaca-se que o R^2 (0,050), como já mencionado, é pequeno para evidenciar uma equação na qual as variáveis independentes tenham alto poder explicativo sobre a variável dependente. Porém, o teste F (14,78) permite a interpretação ao ser comparado com os valores tabelados na literatura (WOOLDRIGE, 2016), no caso $F(4, \infty) > 3,32$, os quais definem que a regressão é significativa a 1% (significância global).

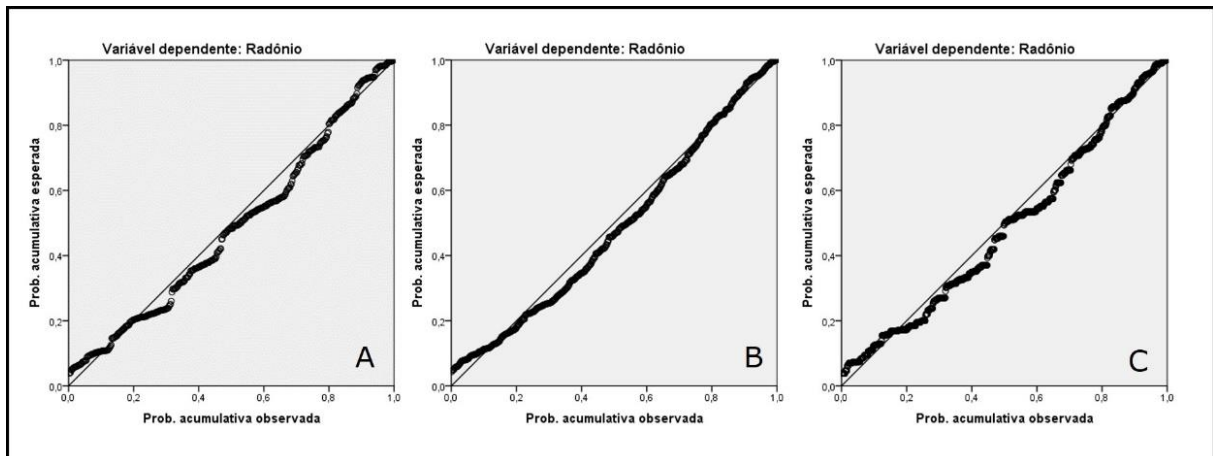
A regressão com os dados agrupados reforça por meio do teste t , que é o teste de significância individual, que as variáveis “vento” (-4,81) e “rad solar” (2,62) se mostraram significantes ao nível de 1% em ambos os casos. O valor-p do teste F foi menor que 0,05, ratificando a relação entre as variáveis.

A variável velocidade do vento possui relação negativa com o ^{222}Rn , corroborando com o que já foi citado pela literatura: o vento atua como fator de dissolução do gás, ou seja, quanto maior a velocidade do vento, menor a sua concentração.

Já radiação solar tem relação positiva com o ^{222}Rn , isto é, quanto maior a radiação, maiores são suas concentrações. Esse resultado ratifica o que foi publicado por Dantas *et al.* (2016). No caso da temperatura, independente da baixa significância estatística, é importante citar que, assim como Kumar *et al.* (2016), Dantas *et al.* (2016) e Evrendilek *et al.* (2013), o resultado mostrou uma correlação negativa, ou seja, quanto maior a temperatura, menores os valores de ^{222}Rn .

Considerando o ^{222}Rn e suas relações (positiva em relação a radiação solar e negativa quando se considera a temperatura), parece haver um efeito da radiação solar direta no solo devido à agitação de partículas, o que favorece a difusão do gás do solo para a atmosfera. Outro efeito ocorre quando essa radiação resulta em aumento de temperatura e fluxo vertical, não mencionado por outros artigos, mas provavelmente relacionado ao balanço energético de absorção de ondas curtas e à emissão de ondas longas pela superfície.

Figura 12 – Gráficos das regressões dos resíduos (Bananeiras – A; Cuité – B; e dados agrupados – C)



Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Os gráficos da reta dos resíduos ajustados das regressões realizadas evidenciaram que a regressão apenas com os dados da cidade de Cuité (Figura 12 - B) possui o menor RMSE. Esse parâmetro mede os desvios padrões dos resíduos, e agrega esses resíduos em uma única medida de capacidade preditiva. Embora indique um melhor ajuste dos resíduos da regressão, a apresentação do modelo agregado (Figura 12 - C) é relevante por considerar a análise conjunta de vários outros parâmetros (R, F, coeficientes das variáveis, número de observações etc.).

CONCLUSÕES

Esta pesquisa investigou em duas áreas com fitofisionomias distintas se as variáveis micrometeorológicas possuem poder de explicação em relação aos valores aferidos do ^{222}Rn .

O comportamento diurno do ^{222}Rn em Bananeiras e em Cuité, apesar de bastante instável, mostrou que os picos ocorreram – em sua maior parte – fora da faixa mais quente do dia, das 09h às 16h. Isso evidencia a relação negativa da temperatura e positiva da radiação solar, com o papel dispersivo dos fluxos verticais de ar provocados pela convecção do ar aquecido na superfície. A radiação solar favorece a difusão do ^{222}Rn do solo para a atmosfera, enquanto que a temperatura retrata de forma mais efetiva a convecção (dispersão do gás), razão pela qual possuiriam relações distintas.

Os melhores resultados estatísticos foram obtidos com a análise dos dados agrupados, o que culminou em um modelo de regressão significativa quando analisado de forma global. Em relação aos parâmetros micrometeorológicos que mais possuem significância individual e

que, no caso da área estudada, parecem mais influenciar os resultados do ^{222}Rn são a velocidade do vento (relação negativa) e a radiação solar (relação positiva). Porém, pode-se dizer que é um poder de explicação parcial, pois, de maneira geral, eles apresentam pouca explicação de causalidade (R^2) – ou seja, de se estabelecer uma relação preditiva, de se constatar que se esse modelo fosse aplicado em outra área, os valores seguiriam a mesma perspectiva.

Considerando a grande diferença entre a densidade vegetal das áreas pesquisadas e os valores de ^{222}Rn próximos, não é possível afirmar que haja influência da vegetação. Desse modo, é recomendável novas comparações e outros dados das mesmas áreas no período mais seco (com menos vegetação) para se analisar melhor a relação ou não do ^{222}Rn com a vegetação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, bem como ao Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (DDMA), subprograma da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo estímulo à pesquisa e infraestrutura. Bruno César Dias de Albuquerque agradece ao Instituto Federal do Piauí (IFPI) pelo período de afastamento concedido. Gostaríamos também de agradecer aos revisores anônimos pelos valiosos comentários e ao editor chefe pela supervisão e coordenação no processo de avaliação por pares.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESAs). **Dados Meteorológicos dos Municípios 2015**. João Pessoa, abril de 2015. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/?formdate=2015-04-07&produto=municipio&periodo=mensal>. Acesso em: 20 fev. 2020.

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESAs). **Pluviometria Anual Média (isoietas)**. Dados Geoportal AESA. 2006. Disponível em: <http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/shapes.html>. Acesso em: 22 dez. 2021.



ALBERIGI, S.; PECEQUILO, B. R. S. Níveis de radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 1, n. 1, Campinas, SeTur/SBE, p. 43-55, 2008.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BASKARAN, M. **Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies**. Switzerland: Springer, 2016.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New York: Academic press, 2013.

ĆUJIĆ, M; MANDIĆ, L. J.; PETROVIĆ, J.; DRAGOVIĆ, R.; ĐORĐEVIĆ, M.; ĐOKIĆ, S. D. Radon-222: environmental behavior and impact to (human and non-human) biota. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, p. 69-83, 2021.

CHAGAS NETO, P.; ARAÚJO, L. E. de. Avaliação espaço-temporal da precipitação da microrregião do brejo paraibano. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 13, v. 21, jul./dez. 2017.

CHAVES, L. C.; NAVONI, J. A.; FERREIRA, D. M.; BATISTUZZO, M. S.; COSTA, T. F.; PETTA, R. A.; AMARAL, V. S. Water mutagenic potential assessment on a semiarid aquatic ecosystem under influence of heavy metals and natural radioactivity using micronuclei test. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 7572-7581, 2016.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Apostila Educativa – Radioatividade**. Rio de Janeiro: CNEN, 2013.

DANTAS, R. C.; NAVONI, J. A.; ALENCAR, F. L. S; XAVIER, L. A. C.; AMARAL, V. S. Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 143-157, 2020.

DANTAS, R. C.; NAVONI, J. A.; FERREIRA, D. M.; COSTA, T. F.; MEDEIROS, S. R. B.; AMARAL, V. S. Influence of natural radon and metal contamination on surface water quality from a Brazilian Semiarid Region. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 39, n. 3, p. 275-282, 2017.

DANTAS, V. A.; SANTOS, C. M.; CAMPOS, T. F.; SANTOS E SILVA, C. M.; HOELZEMANN, J. J.; CHAGAS, G. F. B. A Influência de condições meteorológicas na concentração de gás Radônio em uma área de Mata Atlântica dunar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 831-843, 2016.

DELACRE, M.; LAKENS, D.; LEYS, C. Why psychologists should by default use welch's t-test instead of student's t-test. **International Review of Social Psychology**, v. 30, n. 1, p. 92-101, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 2 jan. 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA-US). **Radionuclides (uranium, radium, and radon)**. 1998. Disponível em: www.epa.gov. Acesso em: 07 nov. 2019.

EVRENDILEK, F.; DENIZLI, H.; YETIS, H.; KARAKAYA, N. Monitoring spatiotemporal variations of diel radon concentrations in peatland and forest ecosystems based on neural network and regression models. **Environ. Monit. Assess.**, v. 185, p. 5577–5583, 2013.

FERNANDES, A. **Fitogeografia brasileira**: fundamentos fitogeográficos. 3. ed. Fortaleza: Edições UFC, 2007.

FERREIRA, C. A.; SANTOS, E. J. dos. (org.). **Jaguaribe SE: folha SB.24-Z: estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco**. Rio de Janeiro: CPRM, 2000. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLG).

FRUMKIN, H.; SAMET, J. M. Radon. **CA: A Cancer Journal for Clinicians**, v. 51, p. 337-344, 2001.

GREENE, W. H. **Econometrics analysis**. 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

HAUKOOS, J. S.; LEWIS, R. J. Advanced statistics: Bootstrapping confidence intervals for statistics with “difficult” distributions. **Academic Emergency Medicine**, v. 12, n. 4, p. 360-365, 2005.

HAHN, E. J.; GOKUN, Y.; ANDREWS, W. M. Jr.; OVERFIELD BL, ROBERTSON H, WIGGINS A, RAYENS, M. K. Radon potential, geologic formations, and lung cancer risk. **Prev. Med. Rep.**, v. 2, p. 342-346, 2015.

JAYARATNE, E. R.; LING, X.; MORAWSKA, L. The Role of Vegetation in Enhancing Radon concentration and Ion Production in the Atmosphere. **Environ. Sci. Technol.**, v. 45, n. 15, p. 6350-6355, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Limites do Estado da Paraíba**. Dados Geoportal AESA. 2015. Disponível em: <http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/shapes.html>. Acesso em: 20 dez. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Climas do Brasil 2010**. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa784>. Acesso em: 29 dez. 2021.

KUMAR, K. C.; PRASAD, T. R.; RATNAM, M. V.; NAGARAJA, K. Activity of radon (^{222}Rn) in the lower atmospheric surface layer of a typical rural site in south India. **J. Earth Syst. Sci.**, v. 125, n. 7, p. 1391-1397, out. 2016.



LEVIN, I.; BORN, M.; CUNTZ, M.; LANGENDÖRFER, U.; MANTSCH, S.; NAEGLER, T.; SCHMIDT, M.; VARLAGIN, A.; VERCLAS, S.; WAGENBACH, D. Observations of atmospheric variability and soil exhalation rate of radon-222 at a Russian forest site. Technical approach and deployment for boundary layer studies. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 54, p. 462-475, 2002.

MABESOONE, J. M. Relief of northeast Brazil and its correlated sediments. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, Berlin, v. 10, p. 419-459, 1966.

MALANCA, A.; REPETTI, M.; MACÊDO, H. R. de. Gross alpha-and beta-activities in surface and ground water of Rio Grande do Norte, Brazil. **Applied radiation and isotopes**, v. 49, p. 893-898, 1998.

MARQUES, A. L.; GERALDO, L. P.; SANTOS, W. dos. Níveis de radioatividade natural decorrente do Radônio no complexo rochoso da Serra de São Vicente, SP. **Radiol Bras.**, v. 39, n. 3, p. 215-218, 2006.

MARTENS, C. S.; SHAY, T. J.; MENDLOVITZ, H. P.; MATROSS, D. M.; SALESKA, S. R.; WOFYSY, S. C.; WOODWARD, W. S.; MENTON, M. C.; DE MOURA, J. M. S.; CRILL, P. M.; DE MORAES, O. L. L.; LIMA, R. L. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: nighttime CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. **Global Change Biol.**, v. 10, n. 5, p. 618-629, 2004.

MEDEIROS, R. M.; SANTOS, D. C.; RAFAEL, A. R.; OLIVEIRA, V. G.; CORREIA, D. S.; BRITO, J. I. B. Frequência da precipitação pluvial no município de Bananeiras - PB. In: I CONICBIO / II CONABIO / VI SIMCBIO, 2013, Recife-PE. **Resumos Expandidos...** Recife: CONICBIO, 2013. v. 2.

MEDEIROS, V. C. de; TORRES, H. H. F.; GOMES, H. A. **Sumé, Folha SB.24-Z-D-V: Estados da Paraíba e Pernambuco**. Brasília: CPRM, 2000. 1 CD-ROM, Escala 1:100.000 (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLG).

MORAIS NETO, J. M. de; ALKMIM, F. F. de. A deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 95-106, 2001.

MOSES, H.; LUCAS Jr., H. F.; ZERBE, G. A. The Effect of Meteorological Variables Upon Radon Concentration Three Feet Above the Ground. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 13, n. 1, p. 12-19, 1963.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI**. Washington, DC: The National Academies Press, 1999.

OUTKIN, V. I.; KOZLOVA, I. A.; YURKOV, A. K.; DUTTA, P. K.; MISHRA, O. P.; NASKAR, K. Radon monitoring as a possible indicator of tectonic events. **Journal Earth System Dynamics**, v. 4, p. 93-107, 2013.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Manual da OMS sobre Radônio em ambientes internos: uma perspectiva de saúde pública**. São Paulo: OMS, 2016.

OTTON, J. K. **The geology of radon** PY. USGS Publications Warehouse. 1992. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/7000018>. Acesso em: 01 jun. 2019.

PUBLIC HEALTH ENGLAND (PHE). **Everything you need to know about radon**. Disponível em: <https://www.ukradon.org/information/>. Acesso em: 22 set. 2019.

PUBLIC HEALTH ENGLAND (PHE). **Radon e Saúde Pública**. Relatório de um grupo consultivo independente sobre Radiações Ionizantes. Chilton, Docs RCE 11. Disponível em: http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20110109132023/http://hpa.org.uk/web/hpaweb/bfile/hpaweb_c/1243838496865. Acesso em: 15 ago. 2018.

REIS, R. G. dos. **NORM: guia prático**. Rio de Janeiro: Edição do autor, 2016

REBOITA, M. S; RODRIGUES, M.; ARMANDO, R.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da semiaridez do sertão nordestino (The causes of semi-aridity in the northeast "sertão"). **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 12, v. 19, p. 254-277, jul./dez. 2016.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-graduação de Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, 2004.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Diagnóstico dos municípios**. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico dos municípios de Bananeiras e Cuité, Estado da Paraíba. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Geodiversidade do estado da Paraíba, 2016**. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14706>. Acesso em: 20 jan. 2021.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sens. Environ.**, v. 8, p. 127-150, 1979.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE (UFCG). **Índices de vegetação do Estado da Paraíba**. Departamento de Ciências Atmosféricas UFCG. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/satelite/satelite.html>. Acesso em: 15 maio 2019.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **As regiões naturais do Nordeste, o meio e a civilização**. Recife: CONDEPE, 1970.

WELCH, B. L. The generalization of Student's problem when several different population variances are involved. **Biometrika**, v. 34, n. 1/2, p. 28-35, 1947.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução À Econometria - Uma Abordagem Moderna**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.