



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Variação diurna do Radônio: uma análise comparativa entre os períodos chuvoso e seco em duas áreas na Paraíba

Bruno César Dias de Albuquerque¹, Raquel Franco de Souza², Micael Batista Damasceno³, Reinaldo Antônio Petta⁴

¹ Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Instituto Federal do Piauí/IFPI. E-mail: bruno.albuquerque@ifpi.edu.br (autor correspondente)

² Doutora em Engenharia de Recursos Naturais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN. E-mail: Raquel.franco@ufrn.br

³ Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Instituto Federal do Rio Grande do Norte/IFRN. E-mail: damasceno.micael@ifrn.edu.br

⁴ Doutor em Geologia Regional. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN. E-mail: petta@ccet.ufrn.br

Artigo recebido em 17/11/2021 e aceito em 18/04/2022

RESUMO

A dinâmica do Radônio na atmosfera é bastante influenciada pela composição do solo, granulometria e presença dos precursores de sua série radioativa (Urânio 238). Algumas pesquisas apontam também para influência das variáveis meteorológicas e ação direta ou indireta da vegetação. Por meio de medições emanométricas ativas do gás Radônio no ar, coletas de amostras solo e/ou rochas para análise química por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) foram comparadas duas áreas com características vegetais distintas em diferentes períodos climáticos com base em Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A análise da variação diurna do ²²²Rn no período chuvoso e seco nos municípios de Bananeiras e Cuité na Paraíba não apresentou diferenças significativas, considerando a média dos dados. A análise de frequência dos dados possibilitou inferir que existe um padrão numérico de concentração do gás para as áreas estudadas. As análises granulométricas e de composição química mostraram o solo de Bananeiras com características que favorecem a ocorrência e a difusão do Radônio. As diferenças de fitofisionomia entre os períodos climáticos aparentemente exerceram menor influência nos valores medidos.

Palavras-chave: Radioatividade Natural, Radiação, ²²²Rn, Planalto da Borborema, Índice de Vegetação.

Daily variation of Radon: a comparative analysis between the rainy and dry periods in two areas at Paraíba

ABSTRACT

The dynamics of Radon in the atmosphere is greatly influenced by the composition of the soil, granulometry and the presence of the predecessors of its radioactive series (Uranium 238). Some research also points to the influence of meteorological variables and the direct or indirect action of vegetation. Using active emanometric measurements of the Radon gas in the air, collections of soil samples and/or rocks for chemical analysis by X-ray fluorescence spectrometry (XRF), two areas with different vegetation characteristics in different climatic periods were compared based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The analysis of the diurnal variation of ²²²Rn in the rainy and dry period in the municipalities of Bananeiras and Cuité in Paraíba did not show significant differences, considering the average of the data. The frequency analysis of the data made it possible to infer that there is a numerical pattern of gas emission for the studied areas. The particle size analysis and chemical composition showed the Bananeiras soil with characteristics that favor the occurrence and diffusion of Radon. The differences in phytophysiology between the climatic periods apparently exerted less influence on the measured values.

Keywords: Natural radioactivity, Radiation, ²²²Rn, Borborema Plateau, Vegetation Index

Introdução

O Radônio (²²²Rn), gás radioativo presente em toda atmosfera, apresenta-se bastante heterogêneo em relação à sua ocorrência; existem

locais que apresentam traços, enquanto outros, concentrações extremamente altas, que excedem valores médios e de intervenção preconizados pelas agências de monitoramento ambiental de saúde,

mesmo em medições ao ar livre (UNESCAR, 2000; PHE, 2009; OMS, 2016).

Entender a formação e composição do solo é fundamental para tentar compreender a dinâmica de concentração do radônio. É amplamente reportado na literatura que as características geológicas são a base para se ter uma maior ou menor quantidade do gás (Otton, 1992; Baskaran, 2016; Bezuidenhout, 2019; Bezuidenhout, 2020; Curado, Lopes e Antão, 2021).

A composição do solo e suas condições granulométricas podem estar associadas a uma maior ou menor concentração (Florica et al., 2020). Krupp, Baskaran e Brownlee (2017), estudaram os coeficientes de emanção de radônio (Radon Emmanation Coefficient - REC) em vários tipos de minerais, como zircão, apatita, feldspatos e quartzo, e os resultados indicaram que o menor tamanho de grãos de rochas e minerais tem influência direta em uma maior emanção do ^{222}Rn .

Existem 3 séries radioativas principais citadas na literatura; as do Urânio 238 e 235 (série do Actínio) e do Tório 232. A série do Urânio 238 servirá de referência, pois a partir do decaimento desse elemento é que ocorre, após uma série de transformações químicas a formação do ^{222}Rn de meia vida de 3,8 dias. (CNEN, 2013; UNEP, 2016; Reis, 2016)

Alguns autores (e.g. Martens et al., 2004; Jayaratne, Ling e Morawska, 2011; Motoki et al., 2020), apontam para uma influência direta ou indireta da vegetação na concentração do Radônio, principalmente por meio dos processos de evapotranspiração e no contexto de formação de aglomerados iônicos, o que motivou os recortes espaciais desta pesquisa; buscou-se áreas e períodos com intensa variação de biomassa vegetal.

Abade et al. (2015) mostram que a caatinga, mesmo perdendo as folhas durante determinadas épocas, rapidamente com as chuvas pode atingir em algumas áreas densidades vegetais até maiores do que o cerrado típico, que se mantém fotossinteticamente ativo durante todo o ano. Schucknecht et al. (2013), após compararem a caatinga e áreas de transição com características de cerrado e a mata atlântica, concluíram que a caatinga apresenta menores valores médios, considerando o índice de vegetação, e o maior coeficiente de variação entre os biomas, ou seja, uma alta variabilidade sazonal em relação à densidade e presença da vegetação fotossinteticamente ativa.

Uma das formas de comparar características vegetais, em diferentes períodos climáticos, é por meio de Índices de vegetação, que se utilizam das características de reflectância que os diferentes tipos de vegetação possuem, ao se analisar as faixas espectrais da radiação eletromagnética (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012). Um dos mais comuns e eficientes é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI que, por meio de combinações matemáticas das reflectâncias, é capaz de quantificar e inferir a presença ou não de vegetação, e sua maior ou menor densidade, além de poder ser utilizado, por exemplo, no controle de culturas, e na avaliação do impacto de mudanças meteorológicas. (Liu, 2006; Jensen, 2009; Meneses e Almeida, 2012; Francisco et al., 2014; Araújo et al., 2018).

A relação do Radônio e a influência de variáveis meteorológicas, vem sendo discutida em alguns trabalhos no contexto internacional. Tchorz-Trzeciakiewicz e Kłos (2017), Chowdhury et al. (2019) e Yang et al. (2019) buscaram entender o comportamento diurno do Radônio, e sua relação de variáveis como temperatura, umidade relativa, umidade do solo, dentre outras. Hernández-Ceballos, Legarda e Alegría (2020), analisaram a relação da radiação alpha e sua dependência com as condições meteorológicas no norte da Espanha, assim como Botha et al. (2018) buscaram, além das variáveis meteorológicas, entender a influência da dinâmica de direção dos ventos, visto que em determinadas regiões costeiras a direção determina se as massas de ar são oriundas do continente ou do oceano.

De acordo com revisão sistemática feita por Dantas et al. (2020), no Brasil há pouca pesquisa sobre radioatividade natural e a grande parte encontrada explora apenas aspectos geológicos. Poucos estudos na região Nordeste do Brasil reportam dados sobre a relação entre as concentrações atmosféricas do ^{222}Rn , variáveis meteorológicas e/ou íons atmosféricos. Dantas et al. (2016) investigaram áreas de Mata Atlântica Dunar (RN) no período seco, enquanto Albuquerque et al. (2022) analisaram a relação do Radônio com fatores meteorológicos no período chuvoso em áreas de Floresta Tropical de Altitude e Arbustos xerófitos (Caatinga), no Estado da Paraíba, nos mesmos locais da presente pesquisa.

As áreas de estudo, localizadas nos municípios de Cuité e Bananeiras no Estado da Paraíba, quanto à geologia e altitude, são áreas que

apresentam remanescentes sedimentares terciários, pertencentes à Formação Serra do Martins, com altitudes entre 500 e 850 m, estando sobre o embasamento cristalino do Terreno São José do Campestre (Morais Neto e Alkmim, 2001). Há, porém, diferenças significativas na vegetação, valendo-se principalmente da intensa variação que a caatinga pode ter durante estações climáticas diferentes.

Este trabalho objetiva analisar a variação diurna do Radônio na atmosfera baixa no período chuvoso e seco em áreas de Floresta Tropical de Altitude e Arbustos Xerófitos (Caatinga). Elenca-se como hipótese a existência de um padrão de concentração do gás radônio nas duas áreas, que pode ser influenciado em função das variações de densidade vegetal, estações climáticas, e características de composição de rochas e granulometria de solos.

Foram escolhidas duas áreas para realização das etapas de campo (Figura 1). A primeira área está localizada no município de Bananeiras, na mesorregião Agreste Paraibano e na Microrregião Brejo Paraibano, onde encontram-se relevantes fragmentos de Floresta Tropical de Altitude (Mata Atlântica). Outra característica peculiar de Bananeiras é a média pluviométrica histórica entre 1400 e 1600 mm, acima da média dos municípios próximos de altitude equivalente, porém com médias pluviométricas semelhantes às das cidades litorâneas.

A segunda área escolhida está localizada no município de Cuité, na mesorregião Agreste Paraibano e na Microrregião Curimataú Ocidental; buscou-se tal local, após a análise dos dados de precipitação pluviométrica, altitude, e predominância do bioma caatinga e vegetação arbustiva xerófito.

Delimitação e caracterização da área de estudo

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

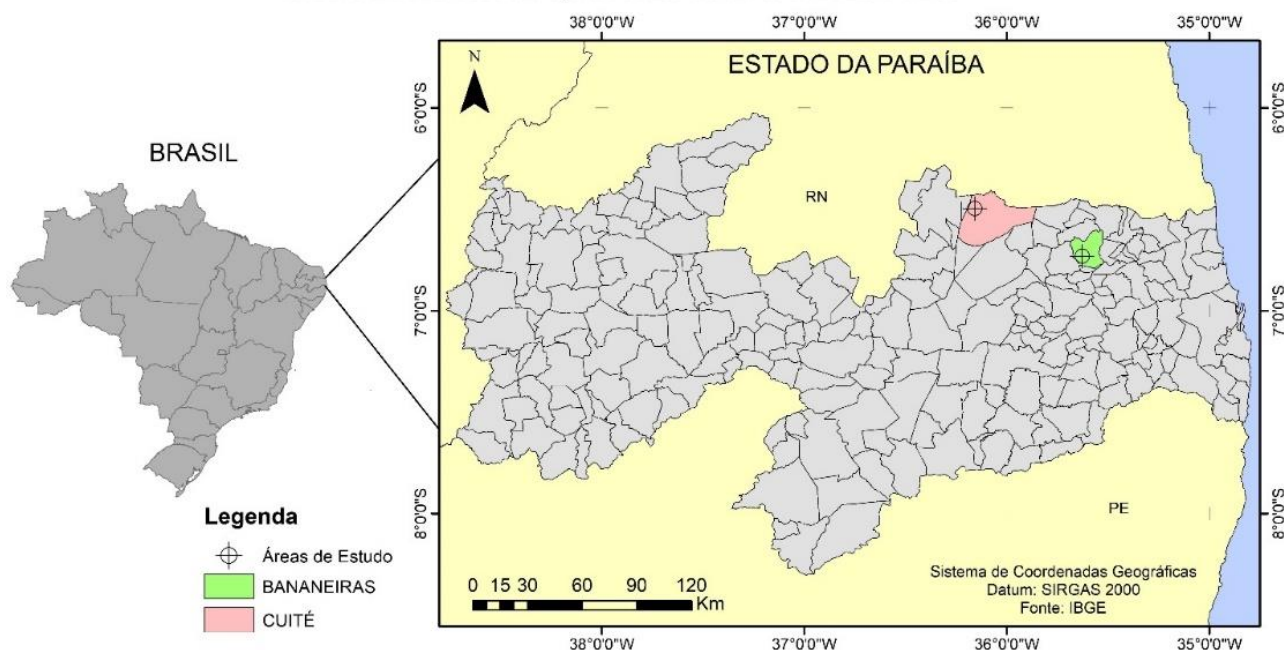


Figura 1 - Mapa de localização das áreas de estudo.

Geologicamente, a área da pesquisa faz parte da Província Borborema, que pode ter fontes expressivas de Radônio, ligado a rochas ígneas e metamórficas; estas estão parcialmente recobertas por arenitos argilosos terciários da Formação Serra dos Martins (Figura 2). Esta formação é constituída na base por arenitos homogêneos e friáveis; na porção média são descritos bancos de arenitos argilosos, homogêneos; no topo da formação

ocorre uma crosta laterítica de cor vermelha a roxa (Mabesoone, 1966; Moraes Neto e Alkmim, 2001). Na serra de Solânea - Bananeiras o capeamento sedimentar ocupa área com cerca de 43 km² e espessura variando de 10 a 50 m. Os litotipos são representados por arenitos brechóides e conglomerados, maciços, com intercalações de arenitos médios e finos (Morais Neto, 1999).

Nas áreas do entorno encontram-se materiais de origem ígnea e metamórfica; o embasamento cristalino é constituído pelos terrenos gnáissico-graníticos do Terreno São José do Campestre, abrangendo o Complexo Serrinha Pedro-Velho e o Complexo Santa Cruz. Esses Complexos são constituídos essencialmente de ortognaisses migmatizados. No âmbito metamórfico podem ocorrer ainda rochas paraderivadas ligadas ao Grupo Seridó na região de

Bananeiras, sendo predominantemente micaxistos e paragnaisses ligados as Formações Seridó e Jucurutu, respectivamente (Guimarães et al., 2007). Ocorrem ainda Plútons de rochas graníticas indiscriminadas; a Suíte Intrusiva Dona Inês, caracterizada por granitos finos cinza a branco, podendo conter muscovita e granada, e o Plúton Solânea, constituído por sienogranito a monzogranito grosso porfirítico, conforme Figura 2 (CPRM, 2016).

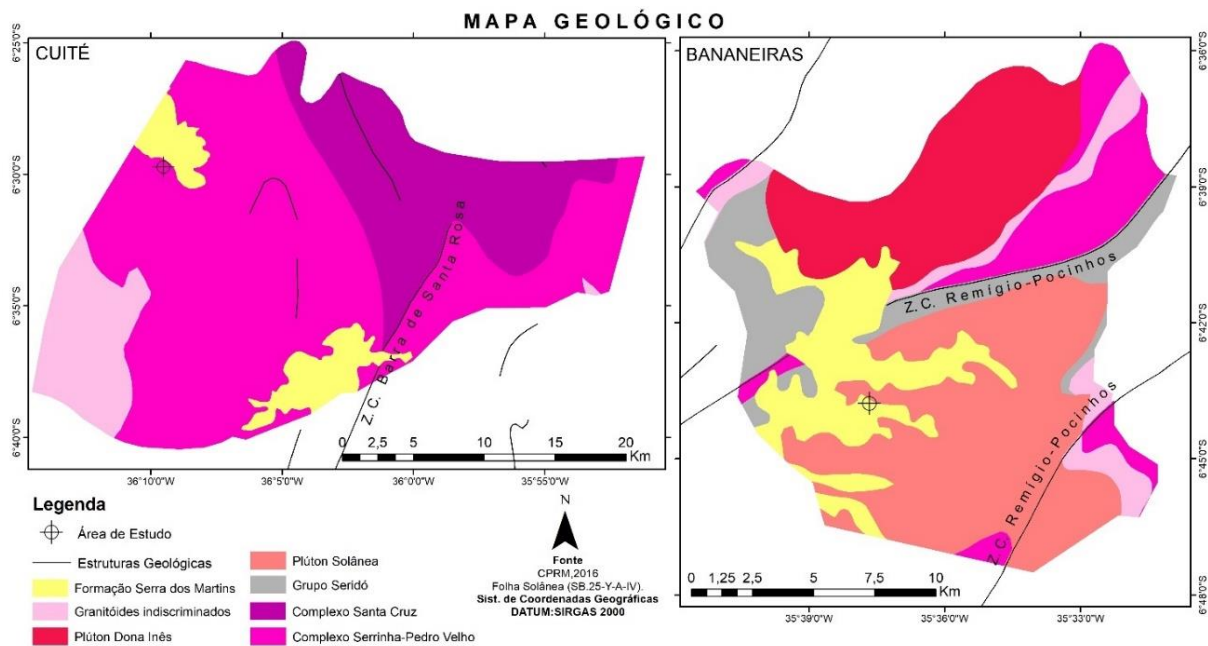


Figura 2 – Mapa Geológico dos municípios de Bananeiras e Cuité. Fonte: CPRM (2016)..

Buscou-se faixas de altitudes próximas (550-600 m) nas duas áreas, para se evitar qualquer interferência de variação de pressão atmosférica. No caso da declividade, em Bananeiras os instrumentos foram instalados no meio de uma área em declive (inclinada), enquanto em Cuité, por uma questão de logística, foram instalados em uma área mais plana, próximo ao início da declividade (Figura 3).

O período escolhido para realização das medições considerou inicialmente a pesquisa realizada por Medeiros et al. (2013), que apresentam análise da série histórica em relação às precipitações, possibilitando identificar os prováveis meses de maior e de menor ocorrência de chuvas. Escolheu-se o mês de abril por se tratar de um dos meses em que há ocorrência de chuvas no período denominado de chuvoso (Figura 4); o mês de novembro historicamente apresenta precipitação pluviométrica mensal mais baixa, sendo mês do período seco. A escolha em função

da variação climática objetivou a geração de dados de comparação, principalmente no sentido de biomassa vegetal, considerando as bruscas transformações de paisagem no semiárido.

Nesse sentido a escolha dos períodos é coerente com os dados em relação à precipitação pluviométrica mensal nas áreas de estudo. A Figura 4 mostra que, de fato, houve precipitações no mês de abril em Bananeiras e em Cuité, bem como nos meses anteriores, o que influencia bastante no aspecto e densidade da vegetação (Figura 3); no mês de novembro não houve registro de chuvas nas duas localidades, sendo de fato o melhor mês para fazer uma comparação considerando os critérios citados. Ressalta-se que, de modo geral, segundo dados de 2015 da Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AES), choveu menos do que o esperado pelas médias históricas; o acumulado para o ano de 2015, foi de 1081,80 mm em Bananeiras, e 459,80 mm em Cuité.

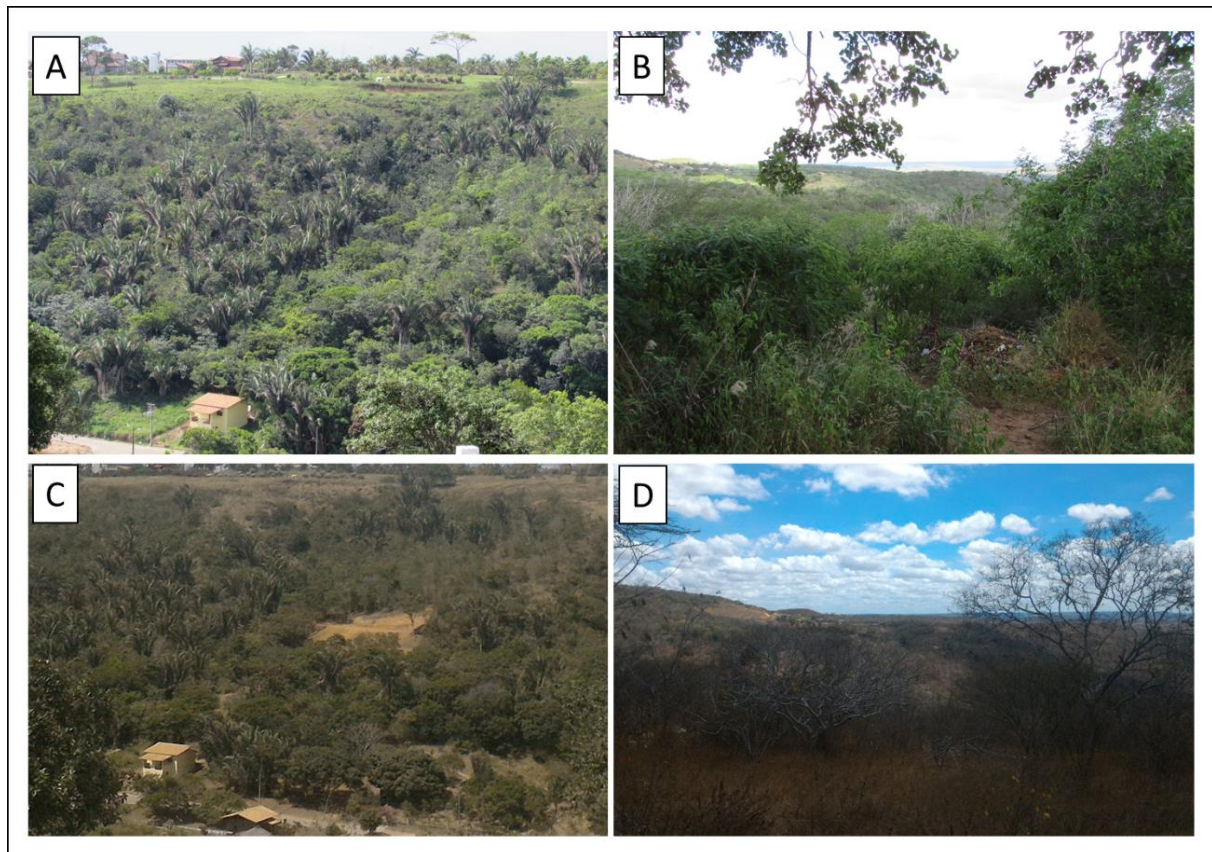


Figura 3 – A) Área de estudo em Bananeiras/PB em abril de 2015 (período chuvoso); os instrumentos de medição foram instalados em local com vegetação arbórea, 20 metros atrás da casa utilizada como apoio, que se encontra em um declive. B) Área em Cuité/PB em abril de 2015 (período chuvoso); os instrumentos de medição foram instalados em meio a vegetação arbustiva. C) Área de estudo em Bananeiras/PB em novembro de 2015 (período seco). D) Área de estudo em Cuité/PB em novembro de 2015 (período seco). Em ambas as áreas, comparando os dois períodos, evidenciam-se as diferenças entre as características da vegetação como sua coloração e densidade vegetal..

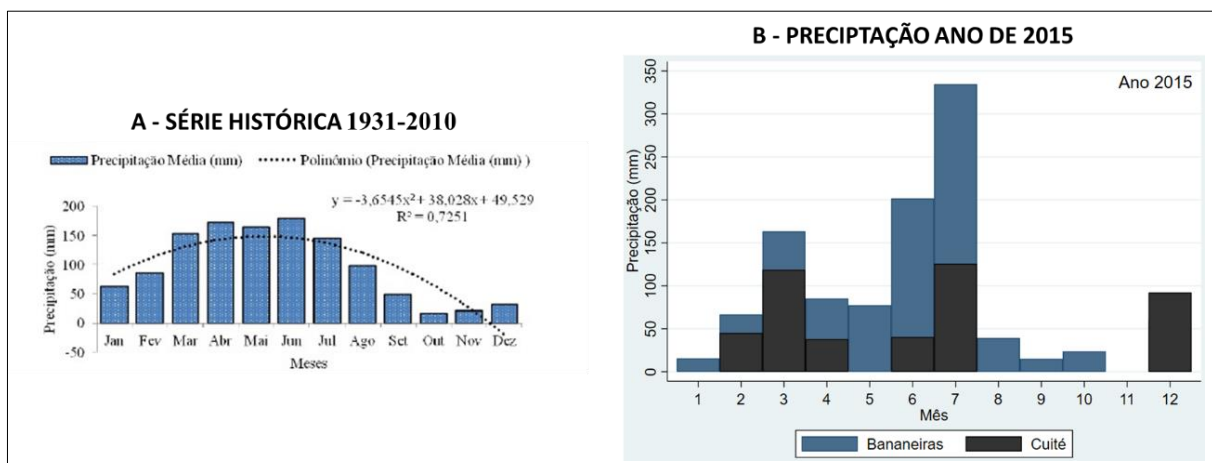


Figura 4 – A) Histograma da Variação espacial da média pluviométrica histórica, no município de Bananeiras/PB, para o período de 1931-2010 (Medeiros, et. al., 2013). B) Precipitação observada em milímetros (mm) por mês para o ano de 2015 nos municípios de Bananeiras e Cuité na Paraíba. Fonte dos dados: AESA (2015).

Metodologia

As etapas e procedimentos que compuseram esta pesquisa serão detalhadas a seguir nos seguintes tópicos: medidas da concentração de ^{222}Rn no ar; amostragem de solos e rochas; análises laboratoriais; e Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Medidas passivas de concentração de ^{222}Rn no ar

Os procedimentos de campo incluíram medições passivas da concentração do gás Radônio na atmosfera, bem como coletas de solo e/ou rochas para análise de composição química e mineralógica. Foram feitos dois ciclos de medições; em abril de 2015, como mês chuvoso, entre os dias 6 e 10 em Bananeiras, e de 16 a 20 em Cuité; em novembro de 2015, mês seco, as medidas foram realizadas de 19 a 23 em Bananeiras e de 24 a 28 em Cuité.

As medidas não foram restritas apenas ao período diurno, de modo a se avaliar as diferenças entre as concentrações de Radônio entre o período diurno e noturno. Os equipamentos de medição foram instalados a um metro da superfície dos solos. O objetivo foi fazer ciclos de quatro dias ininterruptos de medição (96 h sem interrupções, o que gerou um total de 577 registros por cada ciclo), para simbolicamente contemplar um ciclo de meia vida do Radônio, que é de 3,8 dias (UNEP, 2016).

As medições passivas do Radônio e seus descendentes foram feitas com a utilização do medidor AlphaGuard® da Genitron por meio da difusão através de um filtro de fibra de vidro presente na câmara de ionização pulsada. O equipamento foi colocado a um metro da superfície do solo e no modo de fluxo contínuo do instrumento AlphaGuard (Figura 5 – A e B).



Figura 5 – A) Local de medição do Radônio em Bananeiras/PB, com o equipamento fixo em uma árvore a altura de 1 m do chão. B) Detalhes do equipamento utilizado. C) Material Utilizado para coleta de solo. D) Recipiente de armazenamento e mistura para obtenção da amostra composta. E) Esquema de quadrantes utilizado para definir os locais de coleta de sub amostras de solo e/ou rocha; o círculo vermelho representa a posição do equipamento de medição da concentração do Radônio; os círculos pretos, equidistantes de um metro, correspondem aos locais de coleta de sub amostras de solo e/ou rocha. F) Amostra de solo armazenada e identificada.

Amostragem de solos e rochas

Para a amostragem de solos e rochas (Figura 5 – C a F), foi estabelecido um quadrante, tendo como ponto central o local onde foi medido

o gás Radônio; coletaram-se subamostras em um total de nove pontos, com a distância de 1 m entre cada ponto, a fim de obter uma amostra composta mais representativa do local. Na coleta, em cada

ponto, se fez uma limpeza da camada superficial para remoção principalmente de galhos e folhas não decompostos; após isso foi feita uma cova em torno de 20 cm para então coletar a amostra. As amostras obtidas em Bananeiras se apresentaram visivelmente mais desagregadas, úmidas e com maior presença de matéria orgânica, enquanto em Cuité o solo mostrou-se mais seco, compactado e com indícios de um estágio de formação mais inicial (presença de pedriscos e fragmentos principalmente na superfície no entorno da área de coleta).

Apesar do predomínio da Formação Serra dos Martins (FSM), é importante ressaltar que essa Formação foi soerguida sobre o embasamento cristalino (Moraes Neto e Alkmim, 2001); é bastante frequente a ocorrência de rochas graníticas e gnáissicas, sob a forma de afloramentos rochosos e fragmentos isolados no entorno das áreas de estudo (Figura 6 – A e B).

No caso das rochas, foram coletadas quatro amostras com a dimensão de blocos (>64 e <256 mm) apenas em Cuité (no entorno da área de pesquisa), pois em Bananeiras devido ao estágio mais avançado de formação do solo, não foram encontrados clastos maiores próximos ao local de medição. As amostras de solos e rochas podem ser visualizadas na Figura 6 (C a H).

Os solos de Bananeiras e de Cuité apresentam tonalidade creme e alaranjada, respectivamente, sendo classificados em relação à granulometria e coloração segundo Lepsch (2011) e EMBRAPA (2018). As quatro amostras de rocha de Cuité são de origem ígnea, provavelmente associadas a pegmatitos. As amostras 1 e 3 são hololeucocráticas, constituídas essencialmente de quartzo de granulação grossa, enquanto as amostras de rocha 2 e 4 contêm quartzo e feldspato; a amostra 2 é leucocrática, constituída de quartzo, feldspato e alguma muscovita, de granulação fina a média e encontra-se bastante intemperizada; a amostra 4 é hololeucocrática, com quartzo e feldspato de dimensões centimétricas e apresenta evidências de intemperismo.

Análises laboratoriais

Em laboratório utilizou-se a espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), que permitiu a identificação e determinação das concentrações de elementos químicos. Foi utilizado o aparelho da marca NitonTM, modelo XL3t, após processo de calibração interna (Oliveira, Souza e Petta, 2015) para a produção de

resultados quantitativos. O equipamento foi utilizado no modo "*TestAllGeo*", com os três filtros definidos para 30 s e um total de três repetições. O tempo total referente a uma medida foi de 6 min. Posicionou-se o FRX portátil o mais próximo possível da amostra, buscando sua parte mais plana no caso das rochas. As leituras foram extraídas para um computador utilizando o software do aparelho e, em seguida, organizadas em tabelas.

Nas amostras de solo determinou-se a granulometria, com base na norma técnica ABNT NBR 7181, que dentre outras coisas, padroniza ensaios de peneiramento. Para a obtenção do teor de matéria orgânica dos solos (Figura 6 – C e D), cada amostra foi seca em estufa (~100 °C por 30 min) para a remoção da umidade, sendo mantida em dessecador até seu resfriamento à temperatura ambiente. Após isso as amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana, previamente limpos e pesados secos em balança analítica. Foram colocadas 10 g de amostra em cada cadinho, e estes foram levados ao forno mufla para a calcinação a 600 °C. Após resfriamento em dessecador o material foi pesado e, com base na perda de massa, calculou-se o percentual de matéria orgânica calcinada. O experimento foi realizado em triplicata.

Amostras de solo e de rocha das duas áreas estudadas foram enviadas para o Laboratório de Poços de Caldas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (LAPOC/CNEN), onde passaram por preparação envolvendo as etapas de britagem, moagem e homogeneização, e foram analisadas quanto a presença de chumbo, rádio e tório pelo método ISOCS (In Situ Object Counting System), que é um sistema de espectrometria de raios gama baseado em germânio que identifica isótopos radioativos e analisa quantitativamente o conteúdo radioativo de recipientes, superfícies e amostras.

Índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

Os Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) associados a validações feitas em campo, são utilizados para auxiliar na caracterização e comparação entre a vegetação das duas áreas nos dois períodos de medições; foram feitos por meio de imagens do satélite AQUA, obtidas por intermédio do banco de imagens MODIS da Embrapa. O sensor multiespectral MODIS (produto MYD13Q1, com resolução espacial de 250 m), permitiu a obtenção do NDVI por meio da reflectividade das Bandas 1 e 2

(vermelho e do infravermelho próximo), após 16 dias de imageamento. Foram analisadas composições de imagens disponíveis para os meses de abril e novembro de 2015. Foram escolhidas composições que representam os respectivos períodos, de 15 a 30/04/2015, e de 09 a 24/11/2015. No processo de escolha, além de comparar imagens de datas próximas, validá-las em campo com a

análise *in loco* da paisagem, para certificar que os dias imageados poderiam representar o mês, estas também foram comparadas com os índices de vegetação, por meio de composições mensais (resolução espacial de 1 km), disponíveis no site do Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG (<http://www.dca.ufcg.edu.br/>).

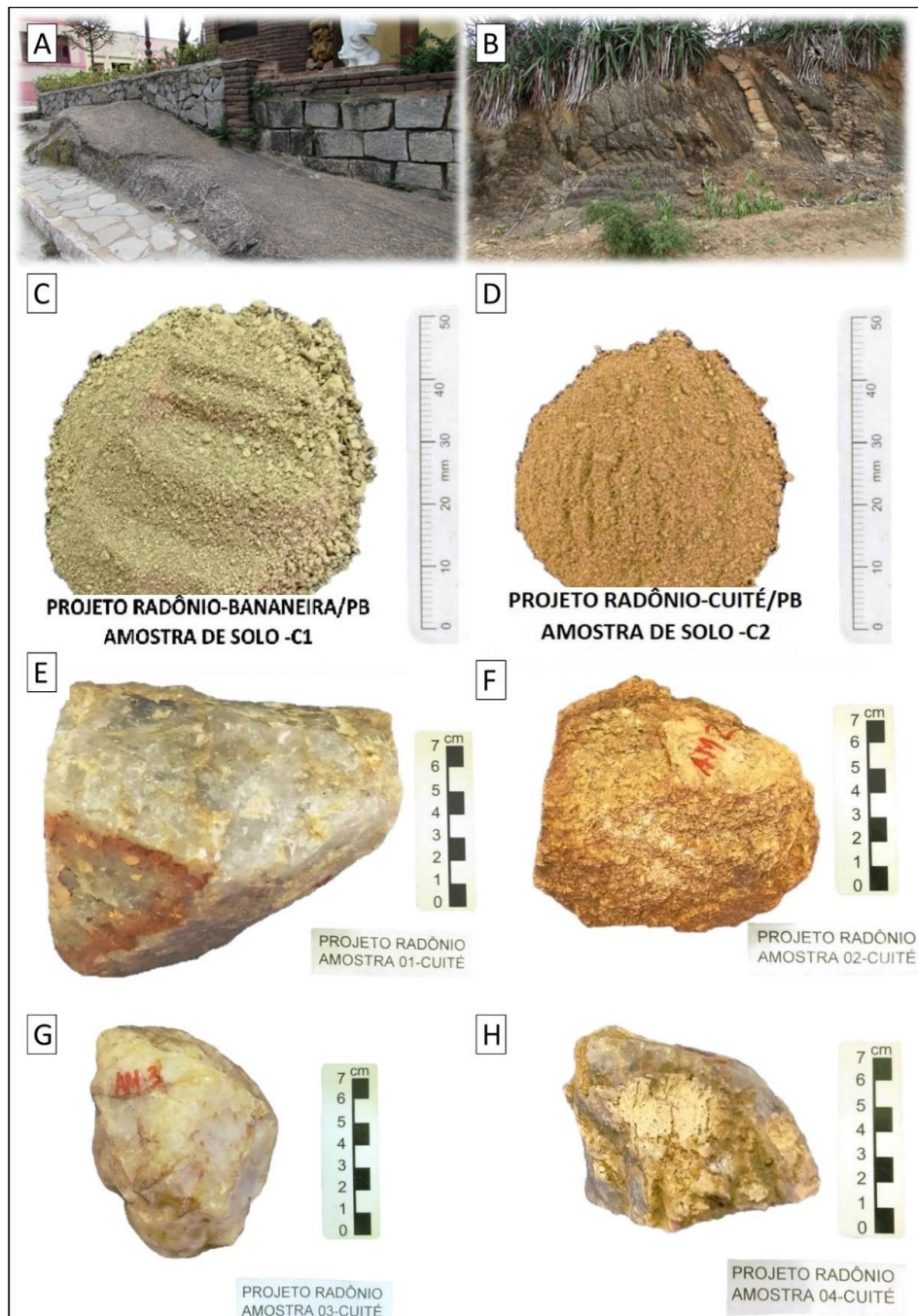


Figura 6 – A) Afloramento rochoso granítico registrado na área central de Bananeiras. B) Afloramento de gnaisses recortados por soleiras pegmatíticas encontradas a cerca de 1 km do local de medição em Cuité/PB. C a H) Solos e rochas coletadas nas áreas de pesquisa.

Resultados e discussão

O radônio na atmosfera baixa, a um metro da superfície dos solos, principal parâmetro da pesquisa, foi medido em Bananeiras e em Cuité, nos períodos seco e chuvoso, pelo período de 4 dias completos, ou seja, por 96 h sem interrupções, o que gerou um total de 577 registros por cada ciclo de medição.

²²²Rn e sua relação com variáveis meteorológicas

Nas medições do Radônio realizadas no período chuvoso (abril) de 2015, segundo dados de Albuquerque et al. (2022), obteve-se em Bananeiras a média de 7,72 Bq/m³, com valores variando de 0 a 26,75 Bq/m³, e mediana de 6,13 Bq/m³. Em Cuité a média foi 6,20 Bq/m³ com valores variando de 0 a 21,38 Bq/m³, e mediana de 6,06 Bq/m³.

Em novembro de 2015, considerado o período seco, o padrão de variação diurna foi similar (Tabela 1); a média do ²²²Rn, de Bananeiras foi um pouco maior, no caso, 8,10 Bq/m³ com variação de 0 a 29,38 Bq/m³, com mediana (8,31 Bq/m³) e valor máximo maiores. Em Cuité, a média e a variação foram respectivamente 6,23 Bq/m³ com variação de 0 a 21,75 Bq/m³, com mediana semelhante ao descrito no período chuvoso (6,06 Bq/m³). Observou-se de modo geral que os valores de Radônio ²²²Rn em Bananeiras foram maiores que os da série de medições em Cuité, e apresentaram maiores variações (instabilidade), como pode ser evidenciado pelo desvio padrão (Tabela 1). Foram percebidas algumas diferenças quanto a distribuição dos dados a serem expostas posteriormente.

Tabela 1 – Síntese da estatística descritiva dos ciclos de medições de ²²²Rn, por quatro dias nas áreas de estudo nos dois períodos amostrados.

Variável ²²² Rn	Média	Mediana	D.P.	Mín*	Máx*	n (registros)
Bananeiras_Chuvoso**	7,72	6,13	4,98	0,000	26,75	577
Bananeiras_Seco	8,10	8,31	4,95	0,000	29,38	577
Cuité_Chuvoso**	6,20	6,06	4,22	0,000	21,38	577
Cuité_Seco	6,23	6,06	4,33	0,000	21,75	577

*Valores em Bq/m³; **Albuquerque et al. (2022).

Visando estabelecer um parâmetro de comparações entre os quatro ciclos do ²²²Rn medidos, optou-se por analisar com software estatístico a distribuição da frequência dos dados amostrados, verificando-se o número de vezes que um dado valor se repete. Esse procedimento pode ajudar, por exemplo, a inferir se existe um padrão de emissão de ²²²Rn. Este padrão, apesar de poder ser influenciado de forma pontual por fatores como a radiação solar, ventos e temperatura, (Albuquerque et al., 2022; Dantas et al., 2016), segue um perfil provavelmente em função das características abióticas locais.

Em relação ao perfil de distribuição de frequência dos dados por faixa numérica, apresentado na Figura 7, observou-se que em Bananeiras nos dois períodos, a faixa entre 8,0 e 9,0 Bq/m³, é onde se observa a maior frequência dos dados, correspondendo a 20,98% do total no período chuvoso e 17,49% no período seco.

Em Cuité houve uma pequena diferença nesse perfil de distribuição; no período chuvoso a maior parte dos valores amostrados encontraram-

se na faixa entre 3,0 e 4,0 Bq/m³, equivalendo a 21,48% dos dados, seguido pela faixa entre 6,0 e 7,0 Bq/m³ (18,55%). Já no período seco, a faixa entre 6,0 e 7,0 Bq/m³ apresentou a maior parte dos valores medidos, 19,58%, e entre 3,0 e 4,0 Bq/m³, registrou-se 18,02% dos dados. Em termos percentuais, observou-se valores próximos.

Ao analisar a frequência, não por faixa, mas por repetição de valores específicos, em Bananeiras no período chuvoso, 8,5 Bq/m³ foi registrado 59 vezes (10,23% da amostra de dados); 6,13 Bq/m³ foi registrado 52 vezes (9,01%) e 3,72 Bq/m³ teve 46 registros (7,9%). Em Bananeiras no período seco (novembro), os valores mais recorrentes foram 8,44 Bq/m³, registrado 58 vezes (10,05% da amostra), 6,13 Bq/m³ com 52 ocorrências (9,01%), e 3,78 Bq/m³, com 40 ocorrências (6,93%). Observa-se que apesar do ciclo de novembro ter registrado um valor máximo maior, percebe-se que existe semelhança entre o perfil numérico dos dados, considerando-se os valores mais recorrentes.

Em Cuité, no período chuvoso (abril), os valores mais recorrentes nas medições foram, 6,13 Bq/m³ com 61 registros (10,57%, da amostra); 3,8 e 8,5 Bq/m³ com 55 registros cada (9,53% dos dados). No período seco (novembro), os dois valores mais observados seguiram o perfil próximo do primeiro ciclo de medições, sendo 6,13 Bq/m³ registrado 76 vezes, (13,17% das medidas,) e 3,78 Bq/m³, 69 vezes (11,96%). O terceiro valor mais frequente, foi 1,43 Bq/m³, com 56 registros (9,71%). Ressalta-se que o valor 8,44 Bq/m³, teve 50 registros (8,67%), se assemelhando a um dos valores descritos no ciclo de abril (8,5 Bq/m³ – 55 registros).

Considerando que a OMS (Organização Mundial de Saúde) estabelece como o nível médio ao ar livre o intervalo entre 5 e 15 Bq/m³, em Bananeiras 90,29% das medições realizadas no período chuvoso estão dentro dessa faixa, e no período seco, 88,91%. Já em Cuité em abril 96,88% dos dados amostrados ficaram dentro da faixa de até 15 Bq/m³, e em novembro 95,49%. Ressalta-se que nenhum valor medido ficou próximo ou excedeu os valores de intervenção preconizados pela OMS e pela PHE, respectivamente 100 Bq/m³ e 148 Bq/m³, referências para riscos relacionados à saúde.

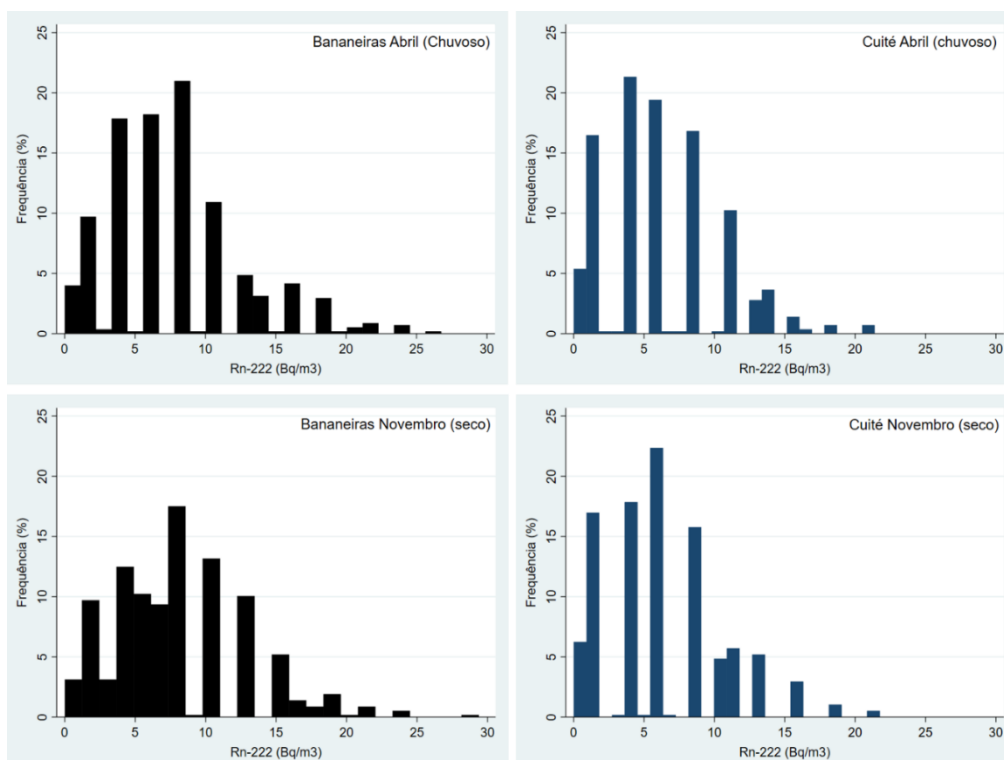


Figura 7 - Histogramas das frequências em porcentagem dos dados das medições de Radônio.

As informações mostradas na Figura 8 reforçam as conclusões obtidas por algumas pesquisas disponíveis na literatura (Moses et al., 1963; Dantas et al., 2016; Kumar et al., 2016; Albuquerque et al., 2022; Chowdhury et al., 2019; Yang et al., 2019), as quais apontam que as variáveis meteorológicas aparentemente podem influenciar pontualmente cada região, considerando o contexto de medição externa (ao ar livre).

A instabilidade mostrada nos gráficos reitera a aleatoriedade do decaimento radioativo. É possível, ao analisar os gráficos das duas áreas nos cenários de período seco e chuvoso (Figura 8),

observar que os intervalos entre o aumento e a diminuição dos valores são maiores (mais largos) no período da noite/madrugada; já nos horários mais quentes do dia, a oscilação entre valores baixos e altos mostra-se intensa, com intervalos menores, e linhas mais próximas umas das outras. Trabalhos de Dantas et al. (2016) e Chowdhury et al. (2019), citam esse comportamento durante o ciclo diurno.

Isto acontece provavelmente pela maior ocorrência de convecção do ar durante o dia, a qual favorece movimentos de dispersão; ainda, segundo autores como Jayaratne, Ling e Morawska (2011) e Motoki et al. (2020), os maiores intervalos seriam

motivados pela maior evapotranspiração da vegetação nesses horários. Chowdhury et al.

apresentaram aumento após o pôr do sol, tornando-se mais alto durante a noite, das 21h00 às 01h00 h, diminuindo até atingir um mínimo por volta do meio-dia. Além do provável efeito de diminuição de ^{222}Rn com o aumento da temperatura por convecção do ar, os autores destacam que rachaduras e poros no solo se aquecem durante o dia e estão consideravelmente dilatados quando o Sol se põe, fazendo com que o gás preso sob a superfície do solo possa emanar após o pôr do Sol.

Destaca-se que não houve registros de precipitação pluviométrica observados nos locais de monitoramento durante o período de pesquisa; os dados de registros de chuvas da AESA ratificaram o fato de não ter havido ocorrência de chuvas no mês de novembro em nenhuma das áreas, e os dados mostram diminuição considerável na umidade. Ao se comparar o período de abril (Albuquerque et al., 2022) e novembro, pode-se inferir que novembro foi menos susceptível a interferências provocadas por umidade ou vapores de água, os quais poderiam influenciar a ocorrência do ^{222}Rn devido a característica de solubilidade do gás (Baskaram, 2016). Yang et al. (2019)

(2019), destacam que nas quatro áreas em que pesquisaram, os níveis de Radônio complementam que a taxa de exalação de ^{222}Rn aumenta até o conteúdo de água do solo exceder cerca de 10%; com maior umidade do solo, a exalação diminui gradualmente.

No contexto de variação diurna, assim como observado por Dantas et al. (2016), Albuquerque et al. (2022), e Chowdhury et al. (2019), a análise numérica dos valores mais altos (picos) revela que existe uma predominância de ocorrência de registros fora da faixa das 09 às 15 h. Esse comportamento foi observado em Cuité e em Bananeiras, nos períodos seco e chuvoso; as medições de Cuité no período de novembro apresentaram uma pequena diferença com mais valores altos de ^{222}Rn nessa faixa de horário.

Outro ponto a ser destacado é que os valores de Bananeiras seguem uma maior variação em relação à média (desvio padrão), do que os valores de Cuité, assim como foi apresentado nos dados de abril. Essa amplitude fica evidente na Figura 8 onde é possível comparar todos os cenários em mesma escala, e verificar a oscilação dos valores.

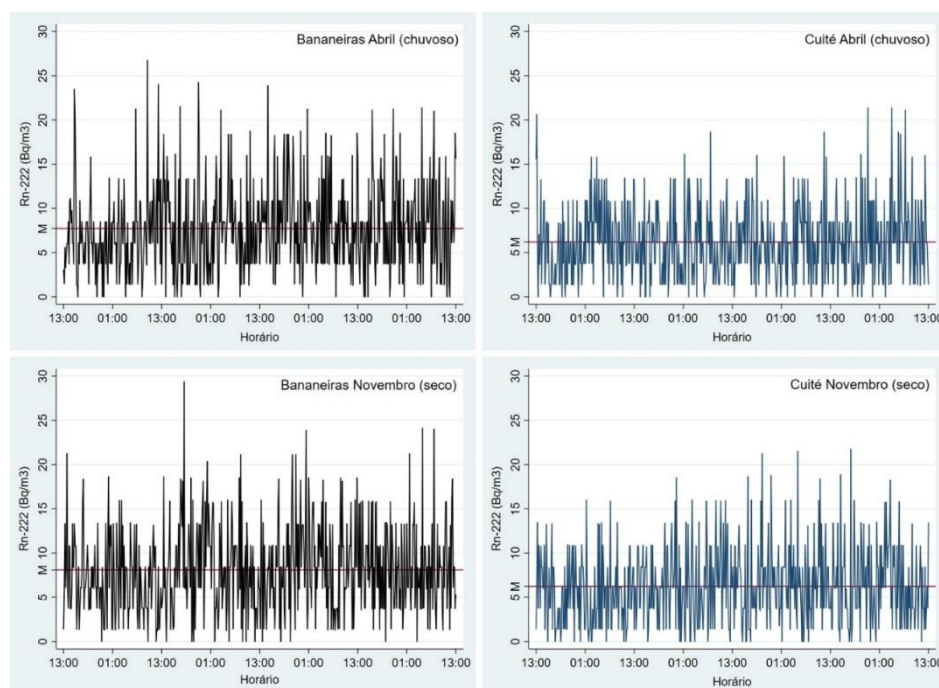


Figura 8 - Gráficos das variações diurnas do ^{222}Rn em Bq/m^3 nas áreas de estudo nos períodos chuvoso e seco com intervalo de 10 minutos entre as medições.

Em busca de uma visualização que evidenciasse melhor as variações horárias do ^{222}Rn

Radônio, optou-se por adotar as médias horárias como referência. Foram usadas as seis medições

realizadas durante o período de uma hora, valendo-se da média aritmética para representar a concentração do radônio no intervalo de uma hora. Os resultados estão expressos nos gráficos da Figura 9. Nesta Figura percebe-se que, em vários momentos durante a variação horária do ^{222}Rn , há uma coincidência da tendência de elevação ou

queda dos valores de ^{222}Rn . Por exemplo, é perceptível uma elevação dos níveis de ^{222}Rn , que ocorre simultaneamente com o horário do nascer do sol (~05:20h em abril e ~04:55h em novembro), que oscila negativamente após o pico, volta a se elevar em torno das 09 h da manhã.

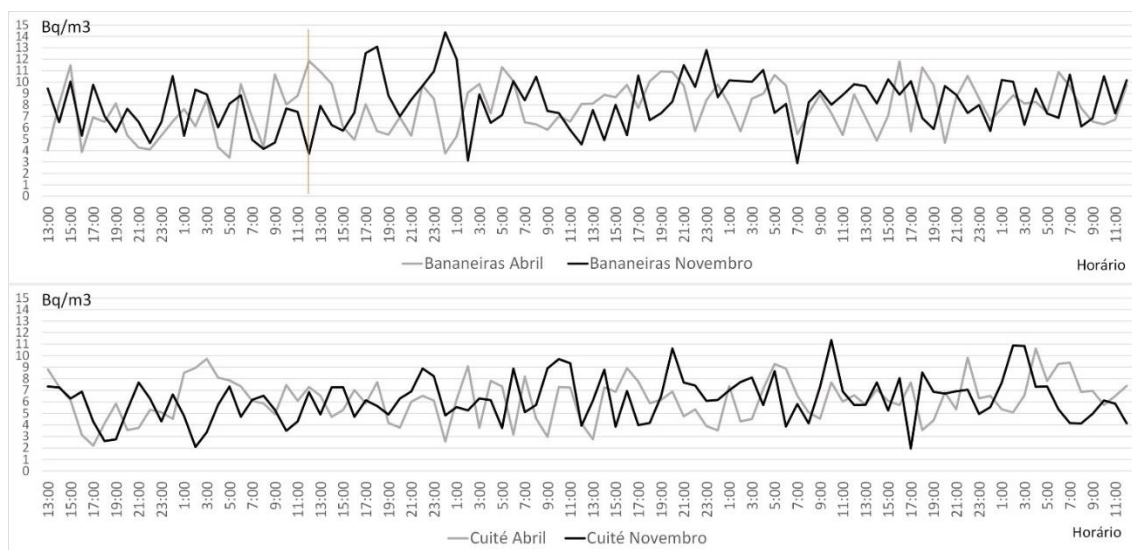


Figura 9 – Gráficos da variação do Radônio considerando as médias horárias nas duas áreas de estudo comparando o período chuvoso (abril) e seco (novembro).

Nos dois tipos de análise, com valores com intervalo de 10 min (Figura 9), ou médias horárias (Figura 8), os maiores valores de médias apresentam predominância fora da faixa mais quente do dia (09-15h), com exceções; a mais evidente é referente ao segundo dia de medições de Bananeiras em abril, onde percebe-se na média horária, um pico por volta das 12h (linha vermelha em destaque na Figura 9), comportamento oposto ao mesmo horário no ciclo de novembro.

Aparentemente fatores pontuais muitas vezes podem influenciar nos valores aferidos. Tchorz-Trzeciakiewicz e Kłos (2017), fizeram medições em região da Polônia em diferentes estações climáticas, com temperaturas médias de 0,7 °C no inverno a 16,9 °C no verão, em 29 pontos entre 466 e 900 m de altitude. Na área mais baixa, inverno e primavera foram as estações com a maior concentração de ^{222}Rn , e verão e outono com o mais baixo; na área mais alta a maior concentração de ^{222}Rn foi registrada na primavera e verão, e a mais baixa no inverno e outono. Os autores atribuíram os valores mais altos no inverno na região mais baixa a eventos de inversão térmica que ocorrem com mais frequência do que nas áreas mais altas.

Características geológico-pedológicas e o aporte de ^{222}Rn

A Tabela 2 apresenta resultados de matéria orgânica presente nas amostras de solo de Bananeiras e de Cuité, e as características granulométricas de cada amostra; percebe-se que os resultados refletem estágios diferentes de formação de solos nas duas áreas, além de denotar um perfil granulométrico com diferenças significativas. Nas duas áreas predomina a classe textural arenosa, sendo Bananeiras com ocorrência arenosa a argilo-siltosa, e Cuité com textura mais fina classificado como argilo-siltico-arenoso. (CPRM, 2016). O perfil pluviométrico é fator influente nos processos de intemperismo; em locais de maiores precipitações tende a predominar o intemperismo químico, enquanto em locais com maior estiagem, prepondera o intemperismo físico, o qual é bem menos eficiente na degradação das rochas e formação dos horizontes do solo (Teixeira et al., 2007).

No contexto do ^{222}Rn , como exposto anteriormente, a permeabilidade do solo e seu estágio de desagregação favorecem a difusão do

^{222}Rn para a atmosfera, porque o gás confinado no subsolo, entre poros e rochas, tem sua emissão natural facilitada se a característica da superfície favorecer. Chowdhury et al. (2019) afirmam nos seus resultados que a área que apresentou maiores valores de ^{222}Rn em suas pesquisas, foi a que possui o solo superficial com mais areia, seixos e cascalhos, além da presença de uma falha próxima ao monitoramento.

Diferenças em termos de composição dos solos podem ser explicadas devido a diversos fatores, como rochas de origem (matriz), influência de afloramentos próximos, ou ainda lixiviação e a erosão acentuada em locais com maiores índices de chuva, como é o caso de Bananeiras.

Pode-se inferir que as condições em Bananeiras favorecem uma maior difusão do gás na atmosfera, visto os teores de silte-argila encontrados (4,90%), serem menores do que Cuité (17,75%) e as frações arenosas mais grosseiras (areia grossa e média) serem mais abundantes do que em Cuité, onde predomina areia fina; frações arenosas mais grossas e menor teor siltico argiloso na amostra de solo de Bananeiras conferem a este um caráter de maior porosidade e permeabilidade. A presença de argila no solo é apresentada como um fator que pode elevar a concentração do radônio no solo, juntamente com possíveis fragmentos de

rochas (FLORICA et al., 2020). Um mapa de porosidade primária (Figura 10) para os municípios, feito com informações da CPRM (2016), mostrou predomínio de áreas de alta porosidade (>30%) em Bananeiras (a área pesquisada se encontra nessa faixa), em comparação com Cuité (predominantemente na faixa de 0 a 15%). Čujić et al. (2021) apontam que a permeabilidade e porosidade dos solos estão entre os fatores mais críticos na concentração do ^{222}Rn . Acrescentam que as maiores concentrações estão associadas a solos de mais altas porosidade e permeabilidade.

Por outro lado, uma porosidade secundária pode estar associada a presença de estruturas nas rochas como fraturamento e cisalhamento. Ocorrem na região estudada importantes estruturas de cisalhamento, como a Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Figura 2). A Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos pelas suas dimensões (largura de sete a oito quilômetros) constitui uma importante descontinuidade na crosta na região estudada (Guimarães et al., 2008). Também ocorre na área a oeste de Cuité a Zona de Cisalhamento Cuité (CPRM, 2014). Essas estruturas profundas podem facilitar o caminho do Radônio desde as rochas do embasamento até regiões mais próximas à superfície

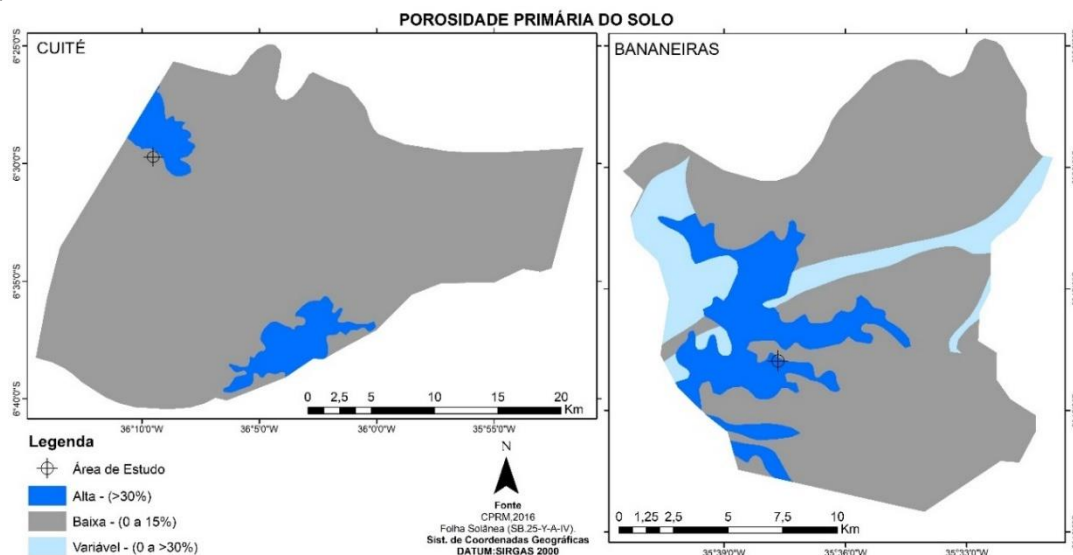


Figura 10 – Mapas de porosidade primária do solo de Bananeiras e Cuité. Fonte: CPRM (2016).

Telahigue et al. (2018), estudando a presença de radônio em águas subterrâneas, encontraram altas concentrações do gás associadas a sistemas de falhas geológicas; isso indica que as descontinuidades em rochas, tais como fraturas, falhas e cisalhamentos, atuam como facilitador do

fluxo vertical do gás pelas rochas. Bezuidenhout (2021) estudando rochas ígneas sedimentares e metamórficas na África do Sul, por meio de mapas, estimou elevadas concentrações de radônio no interior de prédios, relacionadas a várias estruturas geológicas.

Tabela 2 – Resultados de análise semiquantitativa (*), quantitativa de amostras de solo e rocha por meio de espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) e espectrometria gama utilizando o ISOCS (**). Percentuais de matéria orgânica, e análise granulométrica das amostras de solo.

	Solo Bananeiras	Solo Cuité	Rocha Cuité 1	Rocha Cuité 2	Rocha Cuité 3	Rocha Cuité 4
ppm						
Ba	< LOD	842,81	261,33	848,16	311,33	4689,96
Bi*	11,89	22,72	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cd	14,03	< LOD	9,11	< LOD	< LOD	< LOD
Cr	132,79	99,88	116,59	111,07	192,65	117,18
Cs*	< LOD	< LOD	59,34	< LOD	57,90	121,43
Cu	< LOD	95,62	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Mo	9,95	< LOD	< LOD	< LOD	7,05	< LOD
Nb	24,74	18,11	< LOD	8,19	7,54	< LOD
Ni	< LOD	< LOD	< LOD	69,29	< LOD	62,48
Pb	< LOD	26,47	< LOD	37,96	< LOD	47,67
Rb	4,68	105,89	4,21	88,61	< LOD	193,56
Sn	< LOD	< LOD	20,38	< LOD	26,23	24,06
Sr	33,13	523,84	4,66	639,96	< LOD	744,99
Te*	< LOD	< LOD	< LOD	66,29	100,51	168,25
Th	10,56	13,74	< LOD	9,86	< LOD	< LOD
V	< LOD	366,82	< LOD	350,43	< LOD	1004,97
Zn	< LOD	63,18	16,08	23,52	< LOD	< LOD
Zr	510,71	253,56	< LOD	135,07	< LOD	20,96
%						
CaO	0,07	3,21	0,21	1,16	0,08	0,62
Fe₂O₃	3,04	6,89	0,48	3,27	0,15	1,61
K₂O	0,06	2,84	0,34	4,59	0,12	7,91
MnO	0,01	0,11	0,01	0,03	0,00	0,03
SO₃*	0,08	0,06	0,01	< LOD	< LOD	0,01
TiO₂	1,25	0,73	0,16	0,30	0,10	0,39
(Bq/Kg)						
²¹⁰Pb**	37 ± 6	< 35	< 35	< 35	< 35	<35
²²⁶Ra**	22 ± 2	15 ± 3	< 10	< 10	< 10	20 ± 2
²²⁸Ra**	43 ± 4	41 ± 4	< 25	<25	<25	<25
²³⁴Th**	26 ± 10	14 ± 7	< 10	<10	<10	21 ± 9
(%)						
M. Orgânica	5,70	4,12				
Cascalho	1,03	0,69				
Areia Grossa	26,10	13,09				
Areia média	26,11	15,05				
Areia fina	41,86	53,42				
Silte-Argila	4,90	17,75				

*Análises semiquantitativas; as demais análises são quantitativas. Nos resultados do XRF, os elementos químicos As, Se, U, e W em todas as medições ficaram abaixo do limite de detecção e não foram inseridos na tabela; SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, MgO (elementos maiores) e P₂O₅ (elemento menor) não foram dosados. <LOD: abaixo do limite de detecção.

Portanto, a presença das zonas de cisalhamento mencionadas (em Cuité e em Bananeiras) pode ser um fator facilitador da emissão do ^{222}Rn para a superfície. Além disso, nessas regiões, durante as atividades de deformação da crosta, os elementos radioativos podem ser remobilizados mais facilmente ao longo dessas descontinuidades. A área estudada em Bananeiras está entre duas estruturas de Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos, e Cuité está próximo da Zona de Cisalhamento Barra de Santa Rosa (Figura 2). Considerou-se, para fins de comparação, que essa característica da área estudada em Bananeiras favorecerá uma eventual maior influência em relação aos aportes de ^{222}Rn . Bananeiras apresenta uma média de concentração maior ($7,72 \text{ Bq/m}^3$ - chuvoso; $8,10 \text{ Bq/m}^3$ - seco) em relação a Cuité ($6,20 \text{ Bq/m}^3$ - chuvoso; $6,23 \text{ Bq/m}^3$ - seco).

Como visto na literatura, em autores como Lepsch (2011), a vegetação de maior porte e um teor de matéria orgânica mais elevado no solo favorecem o intemperismo e a desagregação do solo em função da mistura com elementos orgânicos e ação das raízes. Em Bananeiras, a vegetação de maior porte e um teor de matéria orgânica mais elevado no solo pode vir a influenciar uma maior concentração do Radônio em comparação com Cuité. Com relação às características pedogenéticas, Bananeiras tem um solo mais bem desenvolvido, provavelmente em função da maior ocorrência de chuvas e maior índice de intemperismo químico (CPRM, 2016).

Como pode ser visto na Tabela 2, o maior teor de Fe foi encontrado na amostra de solo de Cuité, com coloração mais avermelhada, característica esta que está provavelmente mais relacionada à presença de Fe^{3+} do que a quantidade de Fe total (Figura 6-D). O dobro do teor de Zr no solo de Cuité em relação ao solo de Bananeiras provavelmente está relacionado à presença de zircão, que pode conter U e Th em sua estrutura cristalina (Klein, 2002), o que pode provocar anomalias radioativas relacionadas à presença de ^{222}Rn . Além do Zr, ambas as amostras de solo contêm Th. Os ortognaisses associados aos Complexos Santa Cruz e Serrinha-Pedro Velho, em Cuité (Figura 2), tem em sua assembleia minerais que são portadores de zircônio e tório, como a titanita e apatita. Os granitóides em Bananeiras também tem minerais portadores de zircônio.

Turekian e Wedepohl (1961) descrevem a distribuição de elementos químicos na crosta

terrestre. Os autores mostram a maior presença de Urânio (média de 3 ppm de U) e Tório (valores de 8.5 a 17 ppm de Th) em rochas ígneas graníticas. O Rádio e o Radônio estão presentes como núclídeos radioativos nos esquemas de decaimento de U e Th.

Porém, há maiores teores de Rb, Sr e K_2O nas amostras de solo de Cuité, o que indica maior presença de feldspatos. De acordo com Krupp, Baskaran e Brownlee (2017) minerais como quartzo, microclínio e albita tem coeficientes de emissão de radônio (REC) iguais ou superiores aos REC de zircão e outros minerais portadores de U e Th, o que favorecerá maior emissão de Rn em Cuité.

Ćujić et al. (2021), atribuem altas concentrações de urânio associadas a rochas como granitos, pegmatitos e gnaisses. Estas rochas são comuns na região estudada. O substrato de Bananeiras apresenta maior presença de rochas graníticas (Plúton Solânea) do que em Cuité, onde predominam rochas ortognaissicas (Figura 2). As rochas graníticas são as mais abundantes nos elementos urânio e tório (Levinson, 1980; Turekian e Wedepohl, 1961); pode-se relacionar às maiores concentrações de ^{222}Rn em Bananeiras do que em Cuité à presença dessas rochas graníticas. Bezuidenhout (2019) e Curado, Lopes e Antão (2021) colocam como fator importante e contribuinte na presença de elevadas concentrações de radônio nas áreas em que estudaram, as características graníticas do substrato da região. Os resultados de ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{234}Th , das amostras de solo e rocha deste estudo (Tabela 2), apesar de valores próximos, são ligeiramente maiores em Bananeiras. Por serem elementos presentes na série radioativa do urânio, que tem como um dos produtos do decaimento o ^{222}Rn , os resultados da tabela 2 poderiam explicar as concentrações do gás medidas nas áreas e uma provável presença de urânio em Bananeiras, visto que em função da condição de equilíbrio radioativo secular espera-se que o teor de ^{238}U seja similar ao de ^{234}Th .

Buccianti et al. (2009) estudando solos na área do lago Cecite na Itália, atestam que rochas ígneas ácidas e graníticas podem apresentar altas concentrações de urânio ($2\text{-}10 \text{ mg.Kg}^{-1}$). Além desse fator os autores encontraram valores para o ^{222}Rn de mínimo de $16,98 \text{ kBq/m}^3$ e máximo de $55,76 \text{ kBq/m}^3$, muito maiores que os encontrados nesse trabalho, de média de $6,20 \text{ Bq/m}^3$ - chuvoso e $6,23 \text{ Bq/m}^3$ - seco, para Cuité e $7,72 \text{ Bq/m}^3$ - chuvoso e $8,10 \text{ Bq/m}^3$ - seco, para Bananeiras. Os

autores correlacionam também a concentração do ^{222}Rn com o nível de declividade do terreno. Para eles os valores do gás parecem ser baixos ao longo de declives íngremes, onde os solos são particularmente finos, como resposta à erosão, e onde a própria rocha-mãe pode ser exposta à superfície; ao contrário, podem ser encontrados valores elevados do gás em superfícies planas (locais mais estáveis em termos de dinâmica geomórfica), onde os solos tornam-se mais espessos e mais desenvolvidos, de modo que também a sua capacidade de adsorção nos seus sítios reativos (matéria orgânica, argilas e/ou Fe-oxi-hidróxidos) torna-se mais elevado. Os locais de medidas em Cuité e Bananeiras encontram-se em regiões íngremes, em encosta de serra, o que pode esclarecer os baixos níveis de gás encontrados nos dois locais de monitoramento.

Diante das características geológicas e químicas apresentadas é possível depreender que a origem da radiação pode estar associada a presença das rochas graníticas que contém minerais portadores de U e Th; a alteração pelo intemperismo dessas rochas produz (ou influencia), as características químicas do solo; esta relação do solo com as rochas é evidenciada pelo baixo teor de matéria orgânica (<10%), o que indica um solo jovem. Assim, tanto o solo como as rochas devem estar contribuindo com a origem e concentração do radônio na área estudada. Além da origem, as emanções podem estar sofrendo controle da topografia da região, formada por encostas íngremes de serra, bem como da granulometria e porosidade do solo.

Baseando-se nas séries Radioativas do ^{238}U , ^{235}U (série do Actínio) e ^{232}Th foram analisados valores totais de Bi, Pb, Th e U. O U não foi detectado em nenhuma amostra por meio do XRF. Os elementos Th e Bi apresentam maiores valores no solo de Cuité em relação ao solo de Bananeiras, enquanto o Pb foi detectado apenas no solo de Cuité. Em teoria a maior presença desses elementos favoreceria maiores aportes de Radônio em Cuité. O Bi tem mobilidade geoquímica provavelmente baixa, limitada pela coprecipitação com limonita (Hawkes e Webb, 1962), razão que pode contribuir para sua dosagem nas duas amostras de solo analisadas; o solo analisado em Cuité, com mais Bi, apresenta maior teor de Fe_2O_3 .

Muitos dos radionuclídeos que ocorrem naturalmente na Terra emitem radiação gama, porém o Potássio (K), o Tório (Th) e o Urânio (U)

são os únicos elementos de ocorrência natural com radioisótopos (^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U) que produzem raios Gama com energia e intensidade maiores (UNESCAR, 2000). Dessa forma, a presença de potássio (K), também em alguns casos pode estar relacionada a radioatividade, no caso o ^{40}K , que no decaimento tem como filhos, o ^{40}Ar (argônio), que não foi dosado, e ^{40}Ca (cálcio). Nas amostras de Cuité (solo e rochas), os teores de K e Ca foram mais elevados do que na amostra de solo de Bananeiras.

Os blocos de rocha 1, 3 e 4 de Cuité provavelmente são detritos oriundos de pegmatitos, rochas comuns na região, de granulação grossa, com cristais de dimensões centimétricas. A origem pegmatítica destas amostras encontra suporte nos seus teores de Sn, elemento encontrado em veios pegmatíticos (Hawkes e Webb, 1962).

As áreas estão inseridas no Complexo Serrinha-Pedro Velho e Complexo Santa Cruz, onde há ocorrência de plútons (CPRM, 2016). A amostra 2 (Figura 6 - F), de um protólito granítico, apesar de bastante alterada, apresenta textura fanerítica de granulação fina a média. As amostras de rocha 2 e 4 contém feldspato provavelmente potássico, o que é corroborado pelos resultados das análises químicas, em função dos teores mais elevados de alguns elementos químicos em relação às amostras 1 e 3, constituídas essencialmente de quartzo. Os resultados mostram que as amostras 2 e 4 contém mais Ba, Rb, Sr, Ca (que remete a rochas ígneas félsicas), K_2O e Pb (que pode ser encontrado em mica e feldspato potássico).

A fitofisionomia e o aporte de ^{222}Rn

Os índices de vegetação (Figura 11) confirmaram em escala numérica o que ficou evidente já na análise das paisagens nas áreas de estudo (Figura 3); há diferenças relacionadas aos biomas predominantes, bem como entre os períodos de maior precipitação e o de estiagem. O NDVI, para análise de cobertura vegetal, vai variar entre 0 e 1; valores menores do que 0, que podem chegar até -1, são geralmente corpos d'água ou falha nas imagens (Meneses e Almeida, 2012; Liu, 2006).

Considerando a fitofisionomia e as características relacionadas aos efeitos climáticos (Fernandes, 2007), a vegetação das áreas estudadas pode ser classificada em três grupos: perenifólia que apresenta até 10% de perda foliar; semicaducifólia, com perdas foliares de 10 a 60%; e caducifólia, com perdas foliares acima de 60% até

a perda total das folhas. Nas áreas de estudo, Bananeiras apresenta vegetação predominante semicaducifolia, com áreas de vegetação caducifolia nas áreas de transição de bioma

Na escala numérica do mapa que exibe o NDVI para o Estado da Paraíba, considerou-se a classificação utilizada pela UFCG em seu monitoramento mensal, e o trabalho de Abade et al. (2015), que como resultados apontou que as formações com dossel mais denso no domínio da Caatinga (caducifolia e semicaducifolia), apresentam valores de NDVI em média de 0,80 no período chuvoso, enquanto que no período seco, as médias são de 0,33 na faixa caducifolia e acima de 0,44 na faixa de floresta semicaducifolia.

(CPRM, 2005). Já Cuité apresenta predomínio de vegetação caducifolia, como pode ser visto nas fotos da Figura 3 e no NDVI da Figura 11.

A primeira classe (0 a 0,2) apresenta locais que exibem solo exposto. A segunda classe (>0,2 a 0,4) compreende as áreas características de vegetação caducifolia, com perda acentuada de folhas no período seco. A terceira classe (>0,4 a 0,6) engloba áreas com perdas parciais de área foliar (semicaducifolia). Na classe seguinte (>0,6 a 1,0) há presença perene de folhas, com variação de densidade foliar.

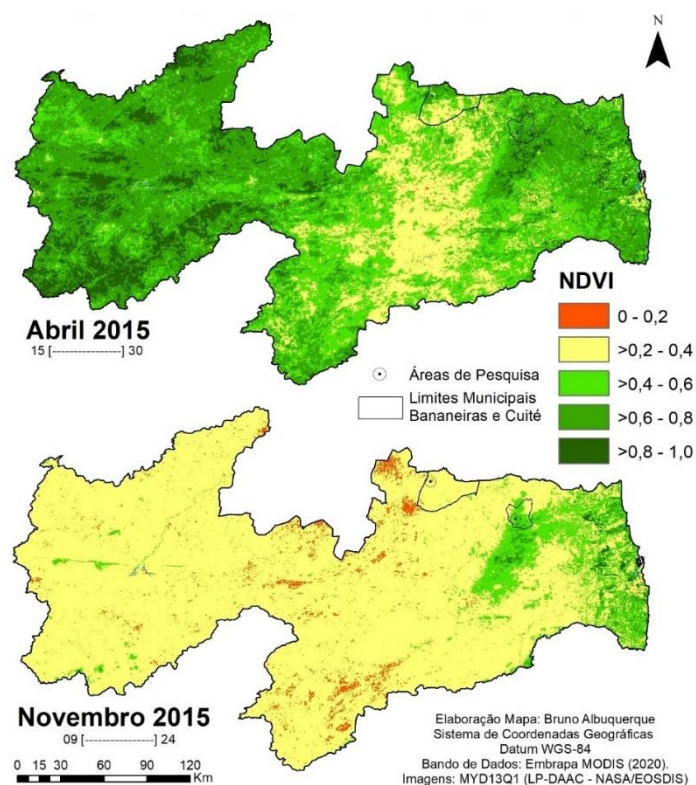


Figura 11 – índices de Vegetação por diferença normalizada (NDVI) do Estado da Paraíba para os meses de abril e novembro de 2015. Elaboração própria.

No município de Bananeiras, principalmente nos locais de transição de biomas, houve a perda de biomassa vegetal em novembro de 2015, visível na cor amarela na faixa entre 0,2 e 0,4 do índice, que remete a uma vegetação bem rala e com pouca folhagem ou nenhuma. No local de medição do ^{222}Rn , já em campo era visível a diminuição da densidade vegetal, apesar das plantas continuarem verdes, visto que não perdem

as folhas como as espécies típicas da caatinga; em novembro era visível o quanto a vegetação estava mais rala e espaçada, enquanto a área municipal em abril encontrava-se predominantemente na faixa mais densa do NDVI (entre 0,8 e 1,0).

Em Cuité, por se tratar de uma área onde predomina a vegetação de caatinga, as mudanças de paisagens são bem mais bruscas. Em abril havia muitas áreas na faixa de 0,4 e 0,6 e até uns pontos

mais densos, ou seja, a vegetação estava verde; já em novembro, como é comum em áreas de caatinga, as árvores e arbustos perdem as folhas como estratégia de resiliência à estiagem; dessa forma, todo o município ficou na faixa entre 0,2 e 0,4 do índice, com alguns pontos que evidenciam solo exposto.

Considerando, por exemplo, os valores de ^{222}Rn semelhantes nas duas áreas, em cenários de evidentes diferenças em relação a presença e a ausência de biomassa vegetal (indicadas por meio do índice de vegetação, que é bastante sensível a clorofila), aparentemente os resultados mostram-se divergentes de trabalhos como os de Jayaratne, Ling e Morawska (2011), e Motoki et al. (2020); estes autores atribuíram uma função significativa da vegetação na dinâmica do ^{222}Rn , evidenciando o processo de evapotranspiração como fator removedor do ^{222}Rn do subsolo até a atmosfera baixa, o que aumenta o teor de ^{222}Rn nesta última. Caso de fato haja alguma interferência da vegetação, as alterações podem ser consequência

simplesmente de fatores físicos relacionados à presença da vegetação, como o sombreamento, barreira em relação aos ventos, menor variação de temperatura ocasionando menos convecção, e desagregação do solo pela ação de raízes.

Períodos climáticos x fatores de influência para o ^{222}Rn

Albuquerque et al. (2022) investigaram os mesmos locais do presente estudo, porém no período chuvoso (abril de 2015), e por meio de modelo de regressão avaliaram se variáveis meteorológicas poderiam explicar valores medidos de radônio. Corroborando com a literatura, os autores constataram relações estatisticamente significativas negativas do vento, e positivas da radiação solar com o ^{222}Rn . Destacaram também relação negativa do ^{222}Rn com a temperatura que exerce papel dispersivo pela convecção do ar aquecido na superfície; e positiva da umidade relativa do ar (inversamente proporcional a temperatura).

Tabela 3 – Síntese dos fatores de provável influência para aportes do Radônio nas áreas estudadas, para os períodos chuvoso (abril) e seco (novembro).

	Chuvoso		Seco	
Características	Bananeiras	Cuité	Bananeiras	Cuité
Radônio (Bq/m ³)	*7,72	*6,20	8,10	6,23
Altitude (m)	550-600 N	550-600 N	550-600 N	550-600 N
Precipitação pluviométrica (mm)	*2,7 -	*0,0 +	0,0 +	0,0 +
Umidade do ar (%)	*89,52% +	*71,97% -	+	-
Radiação Solar (w/m ²)	*19,62 -	*54,11 +	-	+
Ventos (m/s)	*0,14 +	*1,62 -	+	-
Temperatura (°C)	*24,03 +	*25,10 -	+	-
Zonas de Cisalhamento	+	-	+	-
Declividade	-	+	-	+
Litologia Predominante	+	-	+	-
Porosidade Primária do Solo (Predominante)	Alta +	Baixa -	Alta +	Baixa -
Granulometria	Arenoso +	Areno-siltico -	Arenoso +	Areno-siltico -
Matéria Orgânica (%)	+	-	5,7% +	4,12% -
Vegetação	+	-	+	-

*Valores médios medidos por Albuquerque et al. (2022) no período chuvoso. Legenda: características mais favoráveis (+), menos favoráveis (-), ou neutras (N), em relação a presença do ^{222}Rn no ar.

Com base nessas informações, outras literaturas já citadas e observações de campo, a Tabela 3 apresenta uma síntese dos resultados já discutidos, listando atributos de características de cada área de estudo considerando os períodos chuvoso e seco, e classifica se essas características são mais favoráveis (+), menos favoráveis (-), ou neutras (N), em relação a presença do Radônio no ar.

De forma geral, o ^{222}Rn apresentou pouca variação considerando os períodos climáticos, diferente de outros trabalhos, a exemplo de Botha et al. (2018) e Hernández-Ceballos, Legarda e Alegria (2020), que relataram um forte ciclo sazonal nas concentrações de Radônio influenciadas por dinâmicas de ventos continentais e oceânicas. No caso de Bananeiras e Cuité, por se tratar de regiões interioranas, as correntes de ar de origens diferentes, aparentemente não influenciam os aportes de ^{222}Rn .

Conclusões

Observou-se uma semelhança entre os padrões de concentração medidos nos diferentes períodos. A variação do radônio ao ar livre entre os períodos climáticos não foi significativa; alguns fatores, os quais serão elencados a seguir, podem ter contribuído para os maiores valores médios de radônio em Bananeiras, tanto no período seco, como no chuvoso, em relação a Cuité.

Destaca-se em relação aos aspectos meteorológicos mais significativos, menores temperaturas e menor ocorrência de ventos registrados em Bananeiras poderiam justificar a diferença entre as áreas.

No aspecto geológico e de solos, as análises quantitativas da composição química das amostras de solo e rochas, evidenciaram valor significativamente maior de zircônio (Zr) em Bananeiras; o maior portador desse elemento é o mineral Zircão, associado também à presença de Th; em teoria a maior presença desse elemento favoreceria maiores aportes de ^{222}Rn . Os valores ligeiramente maiores de ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{234}Th em Bananeiras seriam mais favoráveis à concentração do ^{222}Rn .

A granulometria do solo é mais favorável a concentração do ^{222}Rn em Bananeiras, pois as frações constituintes são mais grosseiras, porosas e permeáveis. Cuité apresenta areia mais fina e percentuais maiores de silte-argila, que remetem a solos mais compactados com menor permeabilidade.

Pode-se inferir que a variação da biomassa vegetal no caso das áreas estudadas, parece exercer menos influência na variação dos aportes de

radônio do que os outros fatores citados. Mesmo em Cuité com diferenças bruscas na vegetação, mantiveram-se as médias praticamente iguais comparando os dois períodos. O NDVI exemplifica bem as diferenças de fitofisionomia, destacando numericamente a característica de perda de folhas (Caducifolia) observadas em campo, no período seco.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro. Ao Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (DDMA), subprograma da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo estímulo à pesquisa e infraestrutura. Ao Instituto Federal do Piauí (IFPI) pelo apoio à capacitação. À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em especial ao pesquisador Dr. Nivaldo Carlos da Silva pelas análises laboratoriais dos isótopos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{234}Th presentes nas amostras de rocha e solo. Gostaríamos também de agradecer aos revisores anônimos e ao editor chefe pela supervisão e coordenação no processo de avaliação por pares.

Referências

- Abade, N.A., Carvalho Júnior, O.A. de, Guimarães, R.F., Oliveira, S.N., 2015. Comparative Analysis of MODIS Time-Series Classification Using Support Vector Machines and Methods Based upon Distance and Similarity Measures in the Brazilian Cerrado-Caatinga Boundary. *Remote Sens.* 7, 12160-12191. doi:10.3390/rs70912160
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, 2020. Dados Meteorológicos dos Municípios: Dados para o ano de 2015. Disponível: <http://www.aesa.pb.gov.br>. Acesso: 13 Abr. 2022.
- Albuquerque, B.C.D. de, Souza, R.F. de, Souza, D. da S.R. de, Dantas, V. de A., Petta, R.A., 2022. A influência de variáveis meteorológicas na concentração do gás radônio na atmosfera baixa em duas áreas com fitofisionomias distintas no Planalto da Borborema. *Revista Brasileira De Climatologia*, 29, 571–601.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. NBR 7181: Solo: Análise granulométrica. Versão Corrigida: 2017. Rio de Janeiro/RJ.
- Baskaran, M., 2016. Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical

- Studies. Springer Geochemistry. ISBN 978-3-319-21329-3. DOI 10.1007/978-3-319-21329-3
- Bezuidenhout, J., 2019. Estimation of radon potential through measurement of uranium concentrations in granite geology. *South African Journal of Science*, 115(7/8). <https://doi.org/10.17159/sajs.2019/5768>
- Bezuidenhout, J., 2021. Estimating indoor radon concentrations based on the uranium content of geological units in South Africa. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 234, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106647>
- Botha, R., Labuschagne, C., Williams, A.G., Bosman, G., Brunke, E-G., Rossouw, A., Lindsay, R., 2018. Characterising fifteen years of continuous atmospheric radon activity observations at Cape Point (South Africa). *Atmospheric Environment*, Volume 176. p. 30-39. ISSN 1352-2310
- Buccianti, A., Apollaro, C., Bloise, A., Rosa, R. de, Falcone, G., Scarciglia, F., Tallarico, A., Vecchio, G., 2009. Natural radioactivity levels (K, Th, U and Rn) in the Cecita Lake area (Sila Massif, Calabria, Southern Italy): An attempt to discover correlations with soil features on a statistical base. *Geoderma*, 152: 145-156.
- Curado, S., Lopes, S., Antão, A., 2020. On the relation of geology, natural ventilation and indoor radon concentration: the northern Portugal case study. *Comunicações Geológicas*, 107, 31-41. doi:10.34637/nnrt-cv62
- Chowdhury, S., Barman, C., Deb, A., Raha, S., Ghose, D., 2019. Study of variation of soil radon exhalation rate with meteorological parameters in Bakreswar–Tantloi geothermal region of West Bengal and Jharkhand, India. *J Radioanal Nucl Chem* 319, 23–32.
- Ćujić, M., Mandić, L. J., Petrović, J., Dragović, R., Đorđević, M., Đokić, S. D., 2021. Radon-222: environmental behavior and impact to (human and non-human) biota. *International Journal of Biometeorology*, v. 65: 69-83.
- CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2013. Apostila Educativa Radiotividade.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil, 2005. Diagnóstico dos municípios. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnóstico do município de Bananeiras, estado da Paraíba. Recife: CPRM/PRODEEM.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil, 2016. Geodiversidade do estado da Paraíba. Disponível: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14706>. Acesso: Abr. 2022.
- Dantas, R. C., Navoni, J. A., Alencar, F., Xavier, L.A.C., Amaral, V. S., 2020. Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. *Environmental science and pollution research international*, 27(1), 143–157. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06962-6>
- Dantas, V.A., Santos, C.M., Campos, T.F., Santos e Silva, C.M., Hoelzemann, J.J., Chagas, G.F.B., 2016. 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.09, n.03. p.831-843.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Banco de produtos MODIS na base estadual brasileira. Disponível: <https://www.modis.cnptia.embrapa.br>. Acesso: 15 abr. 2022.
- Fernandes, A., 2007. Fitogeografia brasileira: fundamentos fitogeográficos. 3 ed. Fortaleza: Edições UFC. 183 p. ISBN: 978-85-7282-250-3
- Florică, Ș., Burghiele, B. D., Bican-Brișan, N., Begy, R., Codrea, V., Cucos, A., Catalina, T., Dicu, T., Dobrei, G., Istrate, A., Lupulescu, A., Moldovan, M., Niță, D., Papp, B., Pap, I., Szacsvali, K., Tenter, A., Sferle, T., e Sainz, C., 2020. The path from geology to indoor radon. *Environmental geochemistry and health*, 42(9), 2655–2665. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00496-z>
- Guimarães, I. de P., Bittar, S.M.B., Silva, J.M.R. da, Silva, F.M.J. de, Araújo, D.B. de, Arruda, S.D.D., Alcantara, V.C., 2007. Geologia da folha Solânea SB.25-Y-A-IV. UFPE/CPRM.
- Hawkes, H.E., Webb, J.S., 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. New York: Harper & Row. 415 p.
- Hernández-Ceballos, M.Á., Legarda, F., Alegría, N., 2020. Analysis of Alpha Activity Levels and Dependence on Meteorological Factors over a Complex Terrain in Northern Iberian Peninsula (2014–2018). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17:7967.
- Jayarathne, E.R., Ling X., Morawska L., 2011. The Role of Vegetation in Enhancing Radon concentration and Ion Production in the Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.*, 45 (15), pp 6350–6355
- Jensen, J.R., 2009. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos

- terrestres. Tradução: José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) ... [et al.,]. São José dos Campos, SP.
- Lepsch, I.F., 2011. 19 Lições de Pedologia. São Paulo: Oficina de Textos. 456 p.
- Klein, C., 2002. The 22nd edition of the Manual of mineral science. New York: Wiley. 641 p.
- Kumar, K.C., Prasad, T.R., Ratnam, M.V., Nagaraja, K., 2016. Activity of radon (²²²Rn) in the lower atmospheric surface layer of a typical rural site in south India. *J. Earth Syst. Sci.*, 125, No. 7, p. 1391–1397. doi 10.1007/s12040-016-0745-3,
- Krupp, K., Baskaran, M., Brownlee, S. J., 2017. Radon emanation coefficients of several minerals: How they vary with physical and mineralogical properties. *American Mineralogist* 102 (7): p.1375–1383. doi: <https://doi.org/10.2138/am-2017-6017>
- Levinson, A. A., 1980. Introduction to exploration geochemistry. Applied Publusing Ltd. Wilmetde, Illinois.
- Liu, W.T.H., 2006. Aplicações de sensoriamento remoto. Ed. UNIDERP. Campo Grande. 908p
- Mabesoone, J.M., 1966. Relief of northeast Brazil and its correlated sediments. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Berlin, v. 10, p. 419-459.
- Martens, C.S., Shay, T.J., Mendlovitz, H.P., Matross, D.M., Saleska, S.R., Wofsy, S.C., Woodward, W.S., Menton, M.C., MOURA, J.M.S., Crill, P.M., Moraes, O.L.L., Lima, R.L., 2004. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: nighttime CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. *Global Change Biol.*
- Medeiros, R.M., Santos, D.C., Rafael, A. R., Oliveira, V.G., Correia, D.S., Brito, J.I.B., 2013. Frequência da precipitação pluvial no município de Bananeiras - PB. I CONICBIO. Recife.
- Meneses, P.R, Almeida, T., 2012. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Universidade de Brasília (UNB). Brasília.
- Morais Neto, J.M. de, Alkmim, F. F., 2001. A deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*. 31(1):95-106.
- Moses, H., Lucas Jr, H. F., Zerbe, G. A., 1963. The Effect of Meteorological Variables Upon Radon Concentration Three Feet Above the Ground, *Journal of the Air Pollution Control Association*. 13:1, 12-19. doi:10.1080/00022470.1963.10468135
- Motoki, K., Campos, T.F.C., Pastura V.F.S., Sichel, S.E., Fonseca E. M., 2020. A influência da desintegração do Radônio transportado pela evapotranspiração das plantas na formação de aerossóis atmosféricos em ambiente florestal. *Brazilian journal of radiation sciences*.
- Morais Neto, J. M., 1999. As coberturas sedimentares terciárias do interior da Paraíba e Rio Grande do Norte e a gênese da antéclice da Borborema. 251 f. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG.
- Oliveira, R.O., Souza, R.F., Petta, R.A., 2015 Determinação de Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn, Pb e Zn usando Espectrômetro de Fluorescência de Raios X portátil. *Anais do XXVI Simpósio de Geologia do Nordeste*. NATAL/RN.
- OMS. Organização Mundial de Saúde, 2016. Manual da OMS sobre radônio em ambientes internos: uma perspectiva de saúde pública / editado por Hajo Zeeb e Ferid Shannoun. : 1^a Edição. 120 p. São Paulo/SP. ISBN 978-85-67870-03-8
- OTTON, J. K., 1992. The geology of radon PY. USGS Publications Warehouse.1992. Disponível: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/7000018>. Acesso: jun. 2019.
- PHE. Public Health England. Disponível: <https://www.ukradon.org/information>. Acesso: set. 2019.
- Ponzoni, J., Shimabukuro, Y. E., Kuplich, T. M., 2012. Sensoriamento Remoto da Vegetação. 2^a ed. atualizada e ampliada. Oficina de Textos. São Paulo. ISBN 978-85-7975-053-3
- Reis, R.G., 2016. NORM: guia prático. 236p. ISBN: 978-85-922211-0-2
- Schucknecht, A., Erasmi, S., Niemeyer, I., Matschullat, J., 2013. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. *European Journal of Remote Sensing*, 46:1, 40-59. doi: 10.5721/EuJRS20134603
- Teixeira, W., Toledo, M.C.M. de, Fairchild, T. R., Taioli, F. (Org.), 2007. Decifrando a terra. 2^a ed. Companhia Editora Nacional. São Paulo.
- UFCG. Universidade Federal de Campina Grande, 2015. Índices de vegetação do Estado da Paraíba. Departamento de Ciências Atmosféricas UFCG. Disponível: <http://www.dca.ufcg.edu.br/satelite/satelite.html>. Acesso: 15 de abr. 2022.
- UNEP. United Nations Environment, 2016. Radiação: efeitos e fontes (traduzido). Disponível: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/booklet.html>. Acesso: set. 2020. ISBN: 978-92-807-3604-5

- UNESCAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with scientific annexes. Vol 1: sources. ISBN 92-1-142238-8
- Telahigue, F., Agoubi, B., Soud, F., Kharroubi, A., 2018. Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 182: 74-84.
- Turekian, K. K., Wedepohl, K. H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*, v. 72: 175-192.
- Tchorz-Trzeciakiewicz, D.E., Kłos, M., 2017. Factors affecting atmospheric radon concentration, human health. *Science of The Total Environment*, Volumes 584–585. p. 911-920. ISSN 0048-9697
- Yang, J., Busen, H., Scherb, H., Hürkamp, K., Guo, Q., Tschiersch, J., 2019. Modeling of radon exhalation from soil influenced by environmental parameters. *Science of The Total Environment*, Volume 656. p. 1304-1311. ISSN 0048-9697