

MARCADORES ISOTÓPICOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO SOLO EM MANCHAS DE CAATINGA PRESENTES EM NÚCLEO DE DESERTIFICAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Bruno Fonseca da Silva¹

Gustavo Pires Bertaco²

Paulo Sergio Cardoso da Silva³

Deoclecio Jardim Amorim⁴

Maria Victoria Ramos Ballester⁵

Eugênia Cristina Gonçalves Pereira⁶

Andrezza Karla de Oliveira Silva⁷

Plínio Barbosa de Camargo⁸

INTRODUÇÃO

As terras áridas representam cerca de 45% da superfície terrestre do planeta, sendo 16,4 % dessas áreas semiáridas (Silva *et al.*, 2023). Nessas regiões, encontram-se florestas tropicais secas (FTS), que abrigam uma biodiversidade significativa e atuam como importantes reservatórios de carbono do solo, desempenhando um papel crucial na ecologia global (Stan e Sánchez-Azofeifa, 2019). No entanto, a falta de investimentos e ações de conservação, além da limitada quantidade de estudos, têm intensificado o desmatamento e provocado diversos impactos ecológicos, como o aumento no risco da extinção de espécies (IPCC, 2022). As FTS são mais comuns na América Central e do Sul, com Brasil, México e Bolívia, sendo os principais países que abrigam esse tipo de formação vegetal (Schröder *et al.*, 2021). A América do Sul, particularmente, enfrenta graves problemas de desertificação, com 10 % de suas terras apresentando algum nível de degradação (Právālie, 2016).

¹ Doutorando do PPGI- Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo - USP, brunofonseca@usp.br;

² Graduando em Astronomia da Universidade de São Paulo - USP, gustavo.pb@usp.br;

³ Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN, pvcilva@ipen.br;

⁴ Professor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP, amorim@cena.usp.br;

⁵ Professora do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP, vicky@cena.usp.br;

⁶ Professora da Universidade Federal de Pernambuco- UFPE, verticillaris@gmail.com;

⁷ Pesquisadora da Universidade Federal de Pernambuco- UFPE, andrezakarlaufpe@gmail.com;

⁸ Professor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP, pcamargo@cena.usp.br.

No Brasil, as FTS sofrem com o avanço do processo de desertificação na região semiárida do Nordeste, onde a Caatinga, bioma endêmico brasileiro, predomina (Vieira *et al.*, 2020). A desertificação, que consiste na degradação de terras em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, é impulsionada por ações humanas e mudanças climáticas, resultando na perda de fertilidade, produtividade e qualidade do solo (Siyum, 2020). A Caatinga é reconhecida como o núcleo mais rico de florestas secas na região Neotropical, com altos índices de endemismo (Fernandes *et al.*, 2022). Estudos conduzidos por Da Silva *et al.* (2023) projetaram uma diminuição acentuada da vegetação da Caatinga nos próximos 21 anos. Este bioma já é severamente afetado pelas mudanças climáticas e atividades antrópicas, que prejudicam a distribuição ecológica e as espécies reprodutivas (Silva *et al.*, 2019), e o avanço da desertificação pode agravar ainda mais esses impactos.

Com base nesse contexto, torna-se essencial avaliar os níveis de degradação em áreas de Caatinga localizadas em regiões afetadas pela desertificação, a fim de compreender a vulnerabilidade dessas áreas e a possível transição para um estado desertificado. Além disso, a degradação do solo pode gerar uma escassez de informações sobre solos com vegetação natural, o que impacta negativamente pesquisas que dependem de dados de controle. Isótopos, tanto estáveis quanto radioativos, são excelentes indicadores de mudanças ambientais e de degradação do solo, sendo amplamente utilizados em estudos científicos (Meusbürger *et al.*, 2013; Walling *et al.*, 2014). Diante disso, neste estudo busca-se investigar se áreas de Caatinga inseridas em um mesmo núcleo de desertificação apresentam diferentes níveis de degradação. A hipótese testada é que essas áreas podem, de fato, possuir níveis distintos de degradação, o que sugere cautela ao generalizar resultados de estudos realizados na Caatinga. Por fim, o objetivo desta pesquisa é avaliar os níveis de degradação em duas manchas de Caatinga localizadas em um núcleo de desertificação no semiárido brasileiro, utilizando marcadores isotópicos como ferramentas de diagnóstico.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em duas áreas do bioma Caatinga, situadas na Ilha de Assunção, em Pernambuco, no Nordeste do Brasil, com coordenadas 8°30'51"S e 39°18'36" W (Figura 1). Esta região está inserida no núcleo de desertificação de Cabrobó,

caracterizada pela vegetação hiperxerófila típica da Caatinga, clima semiárido e solos do tipo Nossolos, Planossolos e Luvisolos (Da Silva *et al.*, 2023).

Para a coleta, foram delimitadas parcelas de 10 m x 30 m em cada ponto de amostragem, com o início das parcelas localizado a 5 m da estrada e uma distância de 250 metros entre elas. A extensão de 30 m foi selecionada devido às dificuldades impostas pela vegetação densa. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 20 cm, com três pontos de coleta por parcela, totalizando 117 amostras. As análises físicas indicaram que os solos das parcelas são classificados como franco-arenoso, franco-argilo-arenoso e argilo-arenoso.

Foram utilizados como marcadores a abundância isotópica estável dos isótopos $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, além dos radioisótopos ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Th e ^{40}K . A determinação do carbono (C) e nitrogênio (N) total foi realizada juntamente com as análises de isótopos estáveis, aproveitando a capacidade analítica do equipamento para fornecer esses dados.

Os isótopos estáveis $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (em ‰), bem como os valores de C e N total (em mg/g), foram medidos usando um analisador elementar CNHO acoplado a um espectrômetro de massa com razão isotópica, modelo Carlo Erba Delta Plus. Os radionuclídeos ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Th e ^{40}K foram analisados por Espectrometria Gama de Alta Resolução com um detector de germânio hiperpuros (HPGe), da Canberra (EUA). Cada amostra foi contada por 86.400 segundos, enquanto a contagem de fundo foi realizada por 17.800 segundos. Para garantir a qualidade do procedimento analítico, foi utilizado o material de referência IAEA-327 (radionuclídeos em solo) da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

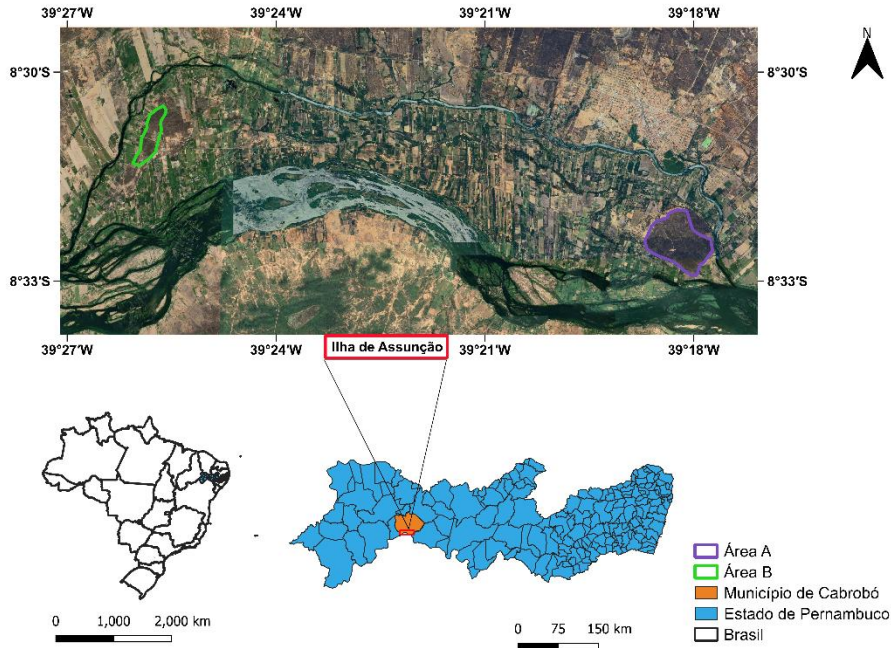


Figura 1. Localização da área de estudo, ilha de Assunção, Cabrobó (Pernambuco)

Os dados obtidos foram organizados no software Excel 2016 e analisados utilizando a linguagem R (R Core Team, 2018). A interpolação e espacialização dos dados foram realizados por meio da krigagem ordinária, empregando o pacote *automap* (Hiemstra *et al.*, 2009). A variabilidade entre e dentro das parcelas das Áreas A e B foi avaliada utilizando o modelo hierárquico:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{(i)j} + \varepsilon_{(ij)k} \quad (1)$$

onde y_{ijk} representa o elemento avaliado, μ é média geral, α_i é o efeito de cada parcela, $\beta_{(i)j}$ é o efeito de cada repetição dentro de cada parcela, e $\varepsilon_{(ij)k}$ é o efeito residual. Os parâmetros do modelo foram estimados usando o método da máxima verossimilhança restrita (REML).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da krigagem ordinária são apresentados na Figura 2. A distribuição espacial dos isótopos nas áreas, assim como de C e N, apresenta um padrão uniforme na Área B. No entanto, a Área A revelou uma distribuição diferenciada para cada elemento, especialmente aqueles que possuem relações, como ^{228}Th e ^{228}Ra , além de C e N. A distribuição do $\delta^{13}\text{C}$ demonstra predominância de plantas com processos de fixação de

carbono dos ciclos C_3 (-30 a -22 ‰) e CAM (-10 a -35 ‰) (Inacio e Urquiaga, 2017). Os resultados obtidos reportam uma predominância da vegetação natural e valores de $\delta^{13}C$ consistentes com a literatura sobre áreas de Caatinga (Häggi *et al.*, 2024).

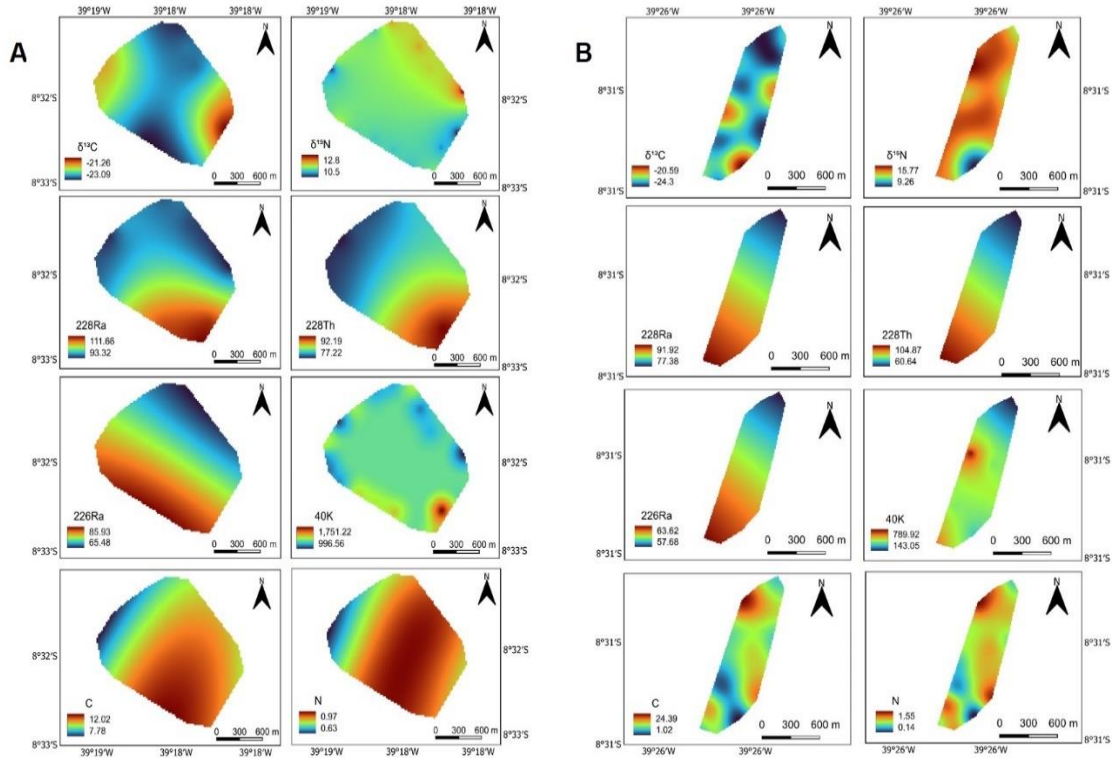


Figura 2. Distribuição espacial dos isótopos nas áreas de estudos a partir da interpolação por Krigagem Ordinária. A: Área A; B: Área B. Unidades de concentração para cada elemento: ^{228}Ra (Bq/kg), ^{228}Th (Bq/kg), ^{226}Ra (Bq/kg), ^{40}K (Bq/kg), $\delta^{15}N$ (‰), $\delta^{13}C$ (‰), C (mg/g) e N (mg/g).

O $\delta^{15}N$ apresentou valores mais elevados para a Área B, possivelmente devido a uma maior evapotranspiração no local em comparação a Área A. A relação isotópica entre $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$ nos solos coletados em áreas do bioma Caatinga, conforme estudos de Santos *et al.* (2021), difere dos resultados desta pesquisa, onde concentrações mais baixas de $\delta^{13}C$ foram correlacionadas com maiores valores de $\delta^{15}N$. Esse processo pode estar associado à resposta das plantas, que fecham seus estômatos para evitar a perda de água, ocorrendo uma diminuição da abundância de $\delta^{15}N$ nestes locais. Os elementos C e N também exibiram comportamentos distintos, com diferenciação espacial na Área A e um padrão mais uniforme na Área B.

Em relação aos radioisótopos, ^{228}Ra , ^{226}Ra e ^{228}Th demonstraram padrões semelhantes de distribuição na Área B, enquanto na Área A observou-se uma influência externa que causou variações na distribuição. O ^{40}K também contribuiu para essa observação, apresentando concentrações extremamente elevadas na Área A superiores a 1.500 Bq/kg, enquanto o valor médio mundial é de 400 Bq/kg (UNSCEAR, 2000). Esse aumento, associado a uma distribuição desordenada dos radionuclídeos, é principalmente atribuído ao uso de fertilizantes, pesticidas e queimadas, indicando uma forte influência da degradação antrópica na área (Ugbede *et al.*, 2021).

Os resultados da avaliação da variabilidade dos resultados são apresentados na Figura 3. Os elementos apresentaram uma variação significativa, demonstrando que alguns elementos possuem alta variabilidade, principalmente dentro da parcela, para ambas as áreas. A Área A apresentou uma variação maior dentro da parcela em comparação à Área B. Na Área A, apenas o ^{228}Th e ^{228}Ra apresentaram uma diferença entre parcelas maior em comparação aos pontos de coleta em cada parcela. A Área B demonstrou o processo inverso, onde as parcelas possuem maior variação em comparação aos pontos de coleta, com exceção principalmente da abundância de $\delta^{13}\text{C}$.

Estes aspectos demonstram que a dinâmica do solo nas respectivas áreas é bastante diferente, e que os níveis de degradação podem ser diferenciados dentro de uma mesma área. As parcelas que possuem variações maiores em relação aos pontos de coleta podem indicar uma maior susceptibilidade à degradação e avanço da desertificação. A Área B, que possui maior variação entre as parcelas, pode indicar uma resistência maior ao avanço do processo de desertificação nesta área.

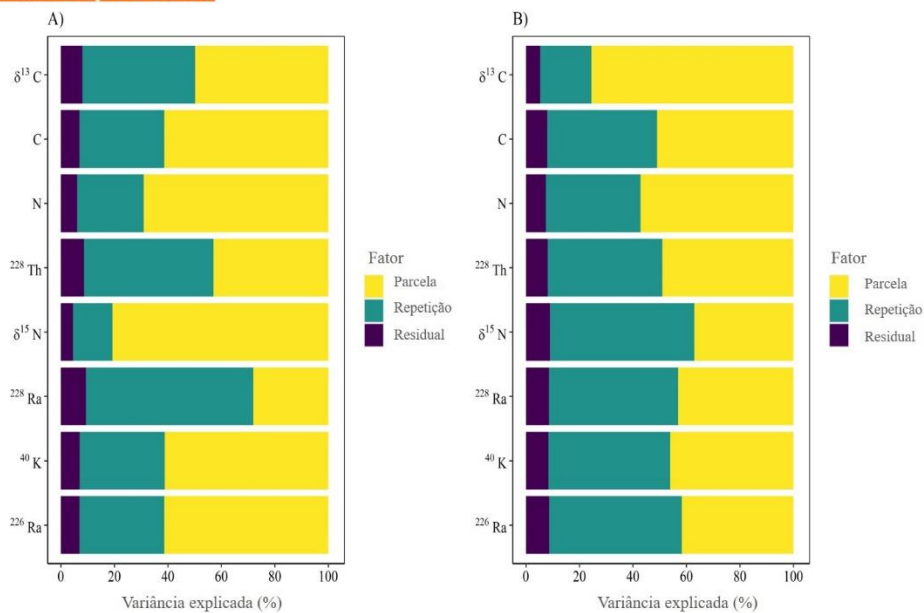


Figura 3. Particionamento da variância para os isótopos e C e N para a Área A (A) e Área B (B) na ilha de Assunção, Cabrobó (Pernambuco).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados demonstraram que os isótopos determinados no solo refletem toda a dinâmica existente na área, sendo altamente recomendado sua utilização em estudos da Caatinga. Ambas as áreas, mesmo estando localizadas na mesma região, possuem processos biogeoquímicos e geoquímicos diferentes. Esses dados alertam para a necessidade de estudos com escalas regionais, visto que as peculiaridades observadas influenciam diretamente os processos ecológicos. Com isso, cada mancha com vegetação Caatinga pode ter um processo de degradação diferenciado, sendo algumas mais susceptíveis que outras.

Palavras-chave: Degradação da Caatinga; Impacto ambiental; Biogeoquímica do solo; Isótopos estáveis; Radionuclídeos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo- FAPESP (Processo: 2020/16120-9) e Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq (Processos: 200780/2022-0; 402372/2022-0).

REFERÊNCIAS

DA SILVA, B. F. *et al.* Evaluating the temporal patterns of land use and precipitation under desertification in the semi-arid region of Brazil. **Ecological Informatics**, v. 77, p. 102192, 2023.

FERNANDES, M. F. *et al.* The Origins and Historical Assembly of the Brazilian Caatinga Seasonally Dry Tropical Forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 10, p. 723286, 2022.

HÄGGI, C. *et al.* Using Multi-Homolog Plant-Wax Carbon Isotope Compositions to Reconstruct Tropical Vegetation Types. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 129, n. 4, p. e2023JG007946, 2024.

HIEMSTRA, P. H. *et al.* Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 8, p. 1711–1721, 2009.

INACIO, C. de T.; URQUIAGA, S. **Aplicações da análise de isótopos estáveis na agricultura**. 2017.

IPCC. **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. Cambridge University Press, 2023.

MEUSBURGER, K. *et al.* Combined use of stable isotopes and fallout radionuclides as soil erosion indicators in a forested mountain site, South Korea. **Biogeosciences**, v. 10, n. 8, p. 5627–5638, 2013.

PRÁVÁLIE, R. Drylands extent and environmental issues. A global approach. **Earth-Science Reviews**, v. 161, p. 259–278, 2016.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2018.

SANTOS, F. L. S. **Relação entre os fatores edafo-climáticos e os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio ao longo do gradiente Pantanal-Cerrado-Caatinga**. 2021. 138 f., il. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SCHRÖDER, J. M.; ÁVILA RODRÍGUEZ, L. P.; GÜNTER, S. Research trends: Tropical dry forests: The neglected research agenda? **Forest Policy and Economics**, v. 122, p. 102333, 2021.

SILVA, J. L. S. E. *et al.* Climate change will reduce suitable Caatinga dry forest habitat for endemic plants with disproportionate impacts on specialized reproductive strategies. **PLOS ONE**, v. 14, n. 5, p. e0217028, 2019.

SILVA, L. A. P. D. *et al.* Mapping of aridity and its connections with climate classes and climate desertification in future scenarios – Brazilian semi-arid region. **Sociedade & Natureza**, 2023.

SIYUM, Z. G. Tropical dry forest dynamics in the context of climate change: syntheses of drivers, gaps, and management perspectives. **Ecological Processes**, v. 9, n. 1, p. 25, 2020.

STAN, K.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. Tropical Dry Forest Diversity, Climatic Response, and Resilience in a Changing Climate. **Forests**, v. 10, n. 5, p. 443, 2019.

UGBEDE, F. O.; OSAHON, O. D.; AGBALAGBA, E. O. Radiological Risk Assessment of ²³⁸U, ²³²Th and ⁴⁰K in Soil and Their Uptake by Rice Cultivated in

CAS Paddy Environment of Abakaliki, Nigeria. **Chemistry Africa**, v. 4, n. 3, p. 691–701, set. 2021.

UNSCEAR. **Exposures from natural radiation sources**. Forty-Sixth session of

UNSCEAR, v. 16, p. 287-296, 2000. Disponível em:

<https://www.unscear.org/docs/reports/annexb.pdf>

VIEIRA, R. M. D. S. P. et al. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 1, p. 224–240, 2021.

WALLING, D. E. *et al.* Upscaling the Use of Fallout Radionuclides in Soil Erosion and Sediment Budget Investigations: Addressing the Challenge. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 2, n. 3, p. 1–21, 2014.