

Intemperismo, Solos e Paisagem

Organização:

- Davi do Vale Lopes





Intemperismo, Solos e Paisagem

Organização:

- Davi do Vale Lopes

MOSSORÓ- RN, 2026.

UERN



Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Reitora

Cicília Raquel Maia Leite

Vice-Reitor

Francisco Dantas de Medeiros Neto

Diretor da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Francisco Fabiano de Freitas Mendes

Chefe do Setor Executivo da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Jacimária Fonseca de Medeiros

Chefe do Setor de Editoração da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Lindercy Francisco Tomé de Souza Lins

Conselho Editorial das Edições UERN

Andreza Tacyana Félix Carvalho

Francisco Fabiano de Freitas Mendes

Franklin Roberto da Costa

Fernanda Abreu de Oliveira

Gleisson do Carmo Oliveira

Ismênia Gurgel Martins

Jacimária Fonseca de Medeiros

Lindercy Francisco Tomé de Souza Lins

Maria Ione da Silva

Otoniel Fernandes da Silva Júnior

Patrícia Batista Barra

Kalidia Felipe de Lima

Saulo Gomes Batista

Sérgio Luiz Pedrosa Silva

Capa e Diagramação

Gabriela Mabel Alves Vieira

**Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

Intemperismo, Solos e Paisagem-Vol.I [recurso eletrônico]. / Davi do Vale Lopes (org.). – Mossoró, RN: Edições UERN, 2026.

212 p.

ISBN: 978-85-7621-589-9 (E-book).

Coleção: Geomorfologia do Brasil.

1. Geomorfologia. 2. Processos geomorfológicos. 3. Intemperismo. I. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. II. Título.

UERN/BC

CDD 551.4

Bibliotecário: Aline Karoline da Silva Araújo CRB 15/ 783

Sumário:



APRESENTAÇÃO.....

07

1. RELAÇÃO RELEVO-SOLO-VEGETAÇÃO EM INSELBERGS NA CAATINGA

09

Inocencio de Oliveira Borges Neto;
Leonardo José Cordeiro Santos;
José João Lelis Leal de Souza;
Bartolomeu Israel Souza;
Rafael Albuquerque Xavier;
Aureliana Santos Gomes.

2. MODELAGEM DE PERDA DE SOLO NOS MUNICÍPIOS COSTEIROS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: RELAÇÕES ENTRE USO E COBERTURA DA TERRA E DINÂMICA EROSIVA

28

Silvio Braz de Sousa;
Marcelo Ribeiro Divino Pereira;
Daniel Carlos Alves Santos;
Rodrigo de Freitas Amorim;
Ana Paula Rodrigues Feitosa Frazão;
Heleriany de Medeiros Madeiros.

3. LEVANTAMENTO DE SOLOS COMO BASE PARA PLANEJAMENTO DO USO DA TERRA NA AGROVILA RAIMUNDO NONATO – SEMIÁRIDO POTIGUAR

41

Ana Livia Araújo de Azevedo;
Renato Batista Cavalcante;
Fabiano Souza de Macedo;
Rone José dos Santos Costa;
Francisco das Chagas Araújo de Paiva;
João Santiago Reis;

4. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS ANTRÓPICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PACIÊNCIA, ILHA DO MARANHÃO

60

Marly Silva de Moraes;
Gilberlene Serra Lisboa;
José Fernando Rodrigues Bezerra;
Regina Célia de Oliveria.

5. DINÂMICAS GEOMORFOLÓGICAS EM AMBIENTES GRANÍTICOS SEMIÁRIDOS: TAFONIZAÇÃO E HONEYCOMBS NO LAJEDO DE PAI MATEUS, CABACEIRAS (PB)

Nádson Ricardo Leite de Souza;
Júlia Stefane da Silva Vieira;
Rafael Albuquerque Xavier.

73

6. ERODIBILIDADE DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAPAMA-PE

Cristiane Barbosa da Silva;
José Coelho de Araújo Filho;
Deyse Ferreira da Silva;
Marcelo Ricardo Bezerra de Miranda;
Osvaldo Girão da Silva;
Paulo Lucas Cândido de Farias.

88

7. ESTRATIGRAFIA DOS PREENCHIMENTOS SEDIMENTARES EM BACIAS DE DISSOLUÇÃO NA SERRA DA BAIXA VERDE

Jeovanes Lisboa da Silva Filho;
Jonas Otaviano Praça de Souza.

104

8. GEOMORFOLOGIA E EVOLUÇÃO DE PAISAGENS: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA ENTRE OS INSELBERGS DE CHAVAL E O MACIÇO DE URUBURETAMA (CEARÁ/BRASIL)

Júlia Stefane da Silva Vieira;
Mariana de Oliveira Araújo;
Frederico de Holanda Bastos;
Lionel Siame.

120

9. TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS EM SOLOS FERRALÍTICOS DESENVOLVIDOS SOBRE PALEO SUPERFÍCIES NA REGIÃO DA SERRA DA CANASTRA (MG)

Diego Fernandes Terra Machado;
Mayra Mac Alpine;
Francisco Sergio Bernardes Ladeira.

136

10.

CARACTERIZAÇÃO DA TRANSIÇÃO SOLO-ROCHA EM GRANITO E GÊNESE DE SOLOS SOBRE GRUS NA REGIÃO DE SALTO (SP)

Mayra Mac Alpine;
Diego Fernandes Terra Machado;
José Antonio Lemos Veronesi;
Emily Suelen dos Santos;
Ticiano José Saraiva dos Santos;
Francisco Sérgio Bernardes Ladeira.

156

11.

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CÁDMIO, ZINCO E NÍQUEL EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO CERRADO BRASILEIRO

João Batista Pereira Cabral;
Fernanda Luísa Ramalho;
Izabella Borges Rodrigues Costa;
Assunção Andrade de Barcelos;
Patrícia da Silva Gomes.

174

12.

ESTUDO DA RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM NA SERRA DA MERUOCA, NOROESTE DO ESTADO DO CEARÁ

José Marcos Duarte Rodrigues;
Simone Ferreira Diniz.

190

13.

CROSTAS BIOLÓGICAS E A ESTABILIZAÇÃO DE TERRENOS AFETADOS POR EROSIÃO NO MUNICÍPIO DE FLORESTA – SEMIÁRIDO D

Luana Bezerra dos Santos;
Isaias Duarte Nunes;
Alissandra Trajano Nunes;
Kleber Carvalho Lima.

202

Intemperismo, Solos e Paisagem

Davi do Vale Lopes





Geomorfologia do Brasil

Apresentação

A **Coleção Geomorfologia do Brasil**, editada pela Edições Uern - EDUERN, reúne contribuições de pesquisadores e pesquisadoras de diferentes regiões do país que apresentaram seus trabalhos no XV Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), realizado em Natal (RN), entre os dias 4 e 8 de agosto de 2025.

Composta por 14 volumes temáticos, a coleção expressa a diversidade e a vitalidade da produção científica brasileira em Geomorfologia, contemplando desde abordagens clássicas até perspectivas inovadoras que integram novas tecnologias, análises ambientais e dimensões sociais da paisagem. Cada livro reflete o compromisso coletivo de fortalecer e divulgar o conhecimento geomorfológico produzido no Brasil, promovendo diálogo entre diferentes áreas e instituições.

... OS VOLUMES QUE COMPÕEM A COLEÇÃO SÃO:



1. Intemperismo, Solos e Paisagem

organizado por Davi do Vale Lopes (UFRN)



2. Processos e Formas de Vertente

organizado por Grace Bungenstab Alves (UFBA)



3. Geomorfologia Fluvial e Lacustre

organizado por José Yure Gomes dos Santos (UFRN)
e Filipe da Silva Peixoto (UERJ)



4. Geomorfologia Costeira, Marinha e Eólica

organizado por Antônio Rodrigues Ximenes Neto (UFRN)



5. Geomorfologia de Áreas Cársticas

organizado por Luiz Eduardo Panisset Travassos (PUC-MG)



6. Geomorfologia Estrutural

organizado por Abner Monteiro Nunes Cordeiro (UFRN)



7. Geomorfologia Ambiental

organizado por Glairton Cardoso Rocha (IFPI)



8. Quantificação de Processos, Modelagem e Geocronologia

organizado por Kleber Carvalho Lima (UPE)
e Everton Vinicius Valezio (UPE)



9. Mapeamento Geomorfológico: Básico e Aplicado

organizado por Rosangela Garrido Machado Botelho (IBGE)



10. Risco Geomorfológico: Diagnóstico, Prevenção e Previsão

organizado por Maria Carolina Villaça Gomes (UERJ)



11. Antropoceno e Geomorfologia Urbana

organizado por Guilherme Borges Fernandez (UFF)
Miguel Felipe (UFJF)
e Maria Luíza de Oliveira Terto



12. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico

organizado por Thiara Oliveira Rabelo (UFRN)
e Luciana Martins Freire (UFPA)



13. Geotecnologias e Inteligência Artificial Aplicadas à Geomorfologia

organizado por Paulo Victor do Nascimento Araújo (IFRN)
e Sílvio Braz de Sousa (UFRN)



14. Ensino de Geomorfologia na Educação Formal e Não Formal

organizado por Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque (UFDFPar)
e José Falcão Sobrinho (UVA)

Mais do que uma coletânea de textos, esta coleção constitui um registro histórico da consolidação da geomorfologia brasileira em múltiplas frentes — teórica, metodológica e aplicada. Esperamos que cada volume inspire novas leituras do relevo, novas formas de pensar a paisagem e novos caminhos de pesquisa comprometidos com a compreensão das dinâmicas da superfície terrestre.

Desejamos a todos uma excelente leitura!

*Jacimária Fonseca de Medeiros, Thaís Guimarães,
e Marco Túlio Mendonça Diniz*

Organizadores da Coleção Geomorfologia do Brasil



RELAÇÃO RELEVO-SOLO-VEGETAÇÃO EM INSELBERGS NA CAATINGA

Inocencio de Oliveira Borges Neto ¹

Leonardo José Cordeiro Santos ²

José João Lelis Leal de Souza ³

Bartolomeu Israel Souza ⁴

Rafael Albuquerque Xavier ⁵

Aureliana Santos Gomes ⁶

PALAVRAS-CHAVE: Pedogênese, Semiárido, Bolsões de solo, Carbono orgânico, Refúgio biogeográfico.

RESUMO

No semiárido brasileiro, afloramentos rochosos graníticos isolados, comumente denominados de inselbergs, emergem como importantes sistemas pedogeomorfológicos, abrigando bolsões de solo que apresentam características pedogenéticas e ecológicas distintas daquelas tipicamente observadas na matriz paisagística circundante da Caatinga. Neste trabalho, buscou-se analisar os principais processos pedogenéticos e a dinâmica ecológica de três perfis de solo ao longo de uma catena na encosta de um inselberg granítico no Cariri paraibano. Foram realizados trabalhos de campo, análises físico-químicas e levantamentos vegetacionais para avaliar as propriedades do solo, estoque de carbono (C) e interações com comunidades vegetais. Os solos, classificados como Neossolos Regolíticos, evidenciaram um gradiente pedogenético intimamente relacionado à posição topográfica. O P1 (topo) apresentou solo raso e arenoso, com baixo teor de carbono orgânico ($C = 1,98 - 3,45 \text{ dag/kg}$) e alta remanescência de fósforo ($P_{\text{REM}} = 43,5 \text{ mg L}^{-1}$), refletindo em limitações no avanço do intemperismo. Por outro lado, P2 e P3 (terço médio e base) são mais profundos, comportam horizontes orgânicos e maiores teores de argila (até 28%) nos horizontes superficiais, além disso, observou-se melanização em ambos os perfis, indicando contribuição do escoamento superficial das posições mais elevadas do relevo, ou seja, sugerindo uma pedogênese mais avançada. Esses perfis exibiram elevados teores de C (até $18,96 \text{ dag/kg}$), nitrogênio ($0,87 \text{ dag/kg}$) e retenção de nutrientes ($P_{\text{REM}} < 20 \text{ mg L}^{-1}$ nos horizontes subsuperficiais), além

- ¹ Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná - UFPR, iobngpb@gmail.com
- ² Professor Doutor do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná - UFPR, santosufpr@gmail.com
- ³ Professor Doutor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa - UFV, jjlelis@ufv.br
- ⁴ Professor Doutor do Departamento de Geociências da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, bartolomeuisrael@gmail.com
- ⁵ Professor Doutor do Departamento de Geografia da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, rafaelxavier@servidor.uepb.edu.br
- ⁶ Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná - UFPR, aurelianagomes7@gmail.com



de menor densidade do solo ($< 1,30 \text{ g cm}^{-3}$) devido ao acúmulo de matéria orgânica e bioturbação. Os estoques totais médios de C atingiram de 80,3 a 105,8 Mg ha^{-1} no P3 e P2, respectivamente, destacando-os como reservatórios de C. A vegetação variou conforme a topografia, onde no P1 encontram-se espécies adaptadas à Caatinga (ex. *Aspidosperma pyrifolium*), enquanto o P3 abriga árvores higrófilas (ex. *Hymenaea rubriflora*) típicas da Mata Atlântica, indicando maior disponibilidade hídrica. A riqueza de espécies e o endemismo foram maiores no P3, reforçando que esses bolsões de solo operam como refúgios de biodiversidade. Os resultados mostram que os bolsões de solo incrustados em inselbergs funcionam como ilhas edáficas, sendo o relevo local responsável por captar e distribuir a água, os sedimentos e os resíduos orgânicos. As posições mais rebaixadas (P2 e P3) tendem a desenvolver solos mais profundos via acúmulo hídrico e atividade biótica, permitindo o estabelecimento de flora adaptada às condições de maior umidade. Esses processos contrastam com a matriz xérica da Caatinga, ressaltando o papel dos inselbergs na manutenção da heterogeneidade ecológica e características paleoambientais em regiões semiáridas. Portanto, destaca-se a importância da conservação dos inselbergs, que sustentam altos estoques de C, biodiversidade excepcional e refúgios microclimáticos. Sua preservação é indispensável à resiliência ecossistêmica frente à desertificação e mudanças climáticas na Caatinga.

INTRODUÇÃO

O relevo é um dos fatores mais importantes para a formação dos solos, pois interfere nos processos pedogenéticos, refletindo na pedodiversidade, seja em escala local ou regional (Musielok; Buczek; Karcz, 2022). A influência topográfica se dá devido ao controle que o relevo exerce sobre a dinâmica hídrica, estrutural e sobre os processos erosivos (Zádorová et al., 2025). Esta dinâmica é compreendida através da relação pedogeomorfológica que é enfatizada por meio da associação entre os tipos de solos, suas principais características, e as posições que estes solos ocupam nos diferentes pontos da paisagem (Oliveira; Santos; Calegari, 2020).

Nas encostas dos afloramentos rochosos graníticos como os inselbergs, que ocorrem no semiárido brasileiro, é observado uma descontinuidade pedológica que formam bolsões de solo em uma espécie de “catena fragmentária” onde, a dinâmica pedológica ocorre em superfície, sem movimento subsuperficial entre os perfis de solo em diferentes posições da encosta, divergindo de ambientes onde ocorre cobertura pedológica contínua (Alves et al., 2024). Inselbergs são intrusões graníticas que ocorrem na paisagem de forma descontinuada (Corrêa et al., 2010). Estas morfoestruturas foram trabalhadas e retrabalhadas por intensos processos erosivos durante o Cenozoico e atualmente, se destacam na paisagem em função da topografia (Maia; Nascimento, 2018; Maia et al., 2025).

Os inselbergs sustentam paisagens excepcionais nos domínios da Caatinga semiárida (Silveira et al., 2022). Na perspectiva da biodiversidade, essas áreas apresentam altas taxas de endemismo (Couto et al., 2021), e por representarem zonas deposicionais e



de recarga hídrica, constituem ambientes mais úmidos em meio a Caatinga xérica (Borges Neto et al., 2025). Com isso, é possível encontrar espécies de plantas compartilhadas de domínios fitogeográficos como Cerrado e Mata Atlântica (Salvador et al., 2023). No contexto pedológico, nestas áreas relictuais ocorrem perfis de solos não condizentes com a matriz paisagística semiárida dominante (Souza et al., 2022).

Os solos dos inselbergs são significativamente importantes, do ponto de vista ciclagem de nutrientes, estoque de carbono, como substrato pedológico para espécies hidrófilas e, do ponto de vista paleoambiental (Souza et al., 2022; Ranulpho et al., 2024). Contudo, os processos que designam e regem a dinâmica de formação destes solos em ambientes semiáridos, ainda são incipientes (Peréz et al., 2023).

Com o objetivo de melhor compreender os processos pedogenéticos em bolsões de solo de inselbergs, este trabalho se propôs a analisar três perfis de solos, sob uma lógica de Catena, posicionada na encosta de um inselberg no semiárido brasileiro.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo está situada entre os municípios de Cabaceiras e Boa Vista, na região do Cariri paraibano (Figura 1), conhecida como a mais seca da Caatinga e consequentemente do Brasil (Prado, 2003). Sujeita ao clima semiárido (Bsh), de acordo com a classificação de Köppen (Ballén et al., 2016), anualmente, as médias de precipitação e temperatura estão na faixa 300 mm e 27 °C, respectivamente (Nascimento et al., 2014). Registros palinológicos próximos a área de estudo (<30 km de distância) relatam que este clima atua há pelo menos 4.900 anos (Souza et al., 2023).

A vegetação é composta por espécies arbustivas, principalmente pioneiras, caracterizando uma paisagem amplamente antropizada (Silva et al., 2017). Na maioria das vezes, a composição florística, é dominada por espécies como *Aspidosperma pyrifolium* (Pereiro), *Jatropha molíssima* (Pinhão Bravo), *Xiquexique gounellei* (Xique-Xique), e *Prosopis juliflora* (Algaroba) (Souza et al., 2015).

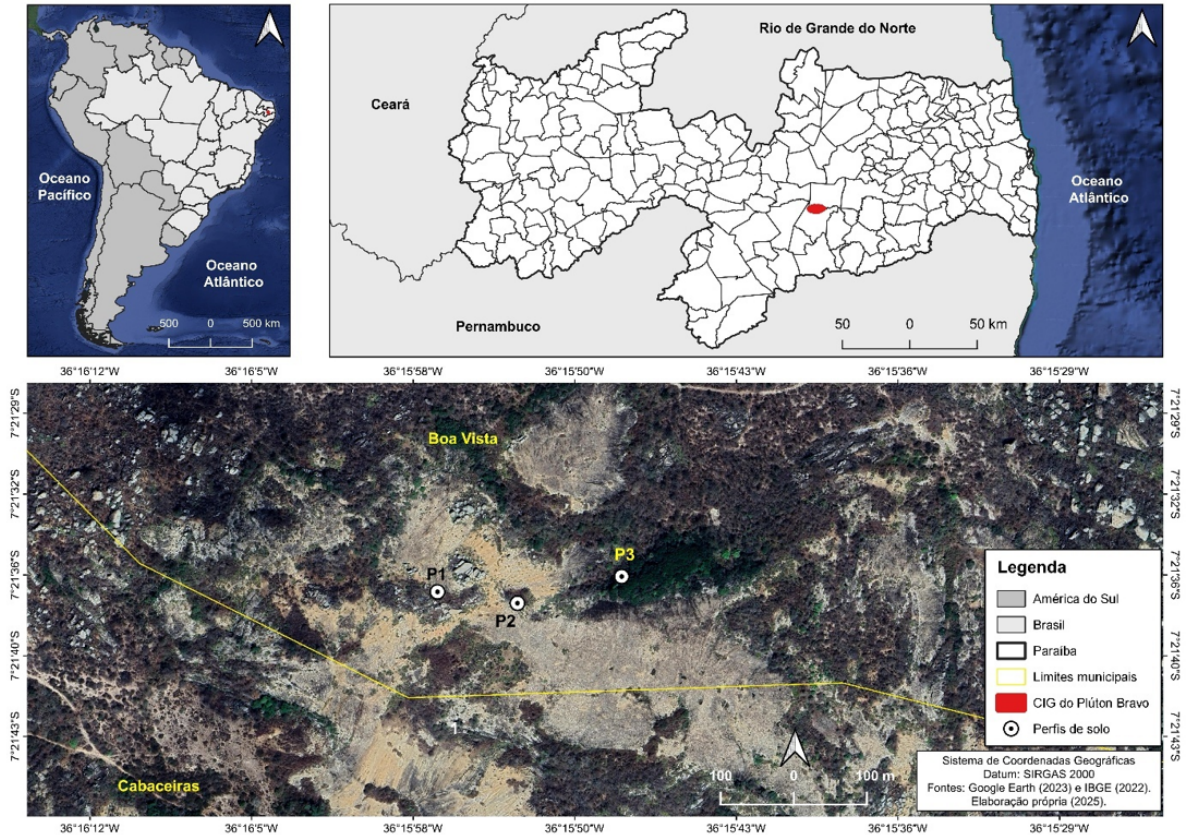
O relevo regional é caracterizado por superfícies aplainadas a suavemente onduladas sobre gnaisses e xistos. Inselbergs de afloramentos graníticos ocorrem abruptamente por serem mais resistentes ao intemperismo e compõem o CIG (Souza; Xavier; Borges Neto, 2024).

Em ambientes com predominância de granitos neoproterozoicos e granitoides ricos em feldspato, predominam os Neossolos Litólicos (Leptosols, 34% da área total), Neossolos Regolíticos (Regosols, 9%) e Cambissolos (Cambisols, 1%). Áreas com gnaisses e xistos associados a colinas amplas e suaves são frequentemente associadas à ocorrência dos



Luvisolos (Luvisols, 22%) e Argissolos (Acrisols, 19%). Nos vales sazonalmente alagados, encontram-se principalmente os Planossolos (Planosols, 13%) e os Vertissolos (Vertisols, 1%) conforme Araújo Filho et al. (2023) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021).

FIGURA 1 – Localização da área de estudo.



FONTE: Google Earth (2023) e IBGE (2022). Elaboração própria (2025).

Esta região tem um histórico de ocupação antiga, a partir de comunidades indígenas, que se intensificou a partir da colonização europeia no século XVII (Souza; Souza, 2016). Atividades antrópicas como desmatamento extensivo, pecuária e agricultura são as principais responsáveis por esta região ser um dos centros mais críticos de desertificação do Brasil (Souza et al., 2015; Tomasella et al., 2018).

Procedimentos metodológicos

Amostragem de solos e suas respectivas análises

Foram abertos três perfis de solo a fim de representar a diversidade pedológica nas áreas escolhidas dentro do Plúton Bravo. Todos os perfis foram descritos e classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Santos et al., 2018) e o World Reference Base Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2022). As coletas



amostrais foram realizadas para representar cada horizonte desde a superfície até o contato lítico em cada perfil, conforme orientações do Manual Técnico de Pedologia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2015).

As amostras coletadas foram secas ao ar e peneiradas em peneira de 2 mm antes das análises química e de textura, de acordo com métodos estabelecidos para solos tropicais (Teixeira et al., 2017). Os teores de areia grossa, areia fina, silte e argila foram determinados pelo método da pipeta após agitação por 16 h com NaOH 0,1 M (Teixeira et al., 2017).

O pH do solo foi medido com um eletrodo de vidro em uma suspensão 1:2,5 v/v solo e água deionizada (H_2O pH) e solução 1 M KCl (KCl pH). O pH delta foi calculado como: $\Delta pH = KCl\ pH - H_2O\ pH$. A acidez potencial (H + Al) foi extraída por solução de acetato de amônio 1 M em pH 7. O teor de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis foram determinados em um extrato 1 M de KCl. K^+ e Na^+ trocáveis serão determinados após extração com Mehlich-1. A partir desses resultados, foi calculada a soma de bases (SB), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica em pH 7 (T) e saturação com Na (ISNA).

O teor de fósforo disponível (P) foi determinado por uma solução de extração de Mehlich-1. O carbono orgânico total (C) foi determinado por combustão úmida (Yeomans; Bremner, 1988). O teor total de Nitrogênio (N) foi determinado pelo método de Kjeldahl (Teixeira et al., 2017). A razão carbono/nitrogênio (C/N) foi calculada em massa. A capacidade de adsorção de P (fósforo) do solo foi determinada após agitação por 1 hora com 2,5 g de solo em 0,01 M $CaCl_2$ contendo 60 mg de $P\ L^{-1}$. A suspensão foi filtrada e o P remanescente na solução (P_{REM}) foi determinado por fotolorimetria (Alvarez et al., 2000).

Amostragem de vegetação

Paralelamente às campanhas de coletas de solo, foram realizadas a identificação das comunidades/espécies vegetais dominantes, além de enfatizar principalmente aquelas mais sensíveis à escassez hídrica, através do método de caminhamento livre (Filgueiras et al., 1994).

Baseado na literatura existente e nas observações *in situ*, utilizou-se a presença ou não de espécies vegetais como bioindicadores de umidade do solo, uma vez que, a disponibilidade hídrica é o fator mais limitante para o desenvolvimento da biota na Caatinga (Paloschi et al., 2021) e essencial para compreensão dos avanços nos processos pedogenéticos (Souza et al., 2022). Todas as informações disponíveis a respeito das espécies foram consultadas através da plataforma Flora e Funga do Brasil (2025).



RESULTADOS

Três perfis de Neossolo Regolítico foram classificados em bolsões de solo em diferentes posições geomórficas ao longo da encosta rochosa de um inselberg (Tabela 1). Seguindo uma lógica de catena, os perfis de solo encontram-se: no topo (P1), no terço médio (P2) e na base (P3). Entre o topo e a base a amplitude altimétrica é de 23 m. Todos os solos apresentam material parental oriundo do granito, contudo, os perfis P2 e P3 também tem contribuição de material coluvial das áreas mais elevadas (Tabela 1). O maior acúmulo de serrapilheira parece estar associado diretamente as posições mais rebaixadas (P2 e P3). O tipo de vegetação associada aos perfis esteve distribuído em espécies que ocorrem na Caatinga (*stricto sensu*), Floresta Estacional Decidual e Semidecidual, vegetação típica de afloramentos rochosos e vegetação de Mata Atlântica e Cerrado (Tabela 1).

TABELA 1 – Descrição geral dos perfis de solos.

PERFIS	WRB	SIBCS	COORDENADAS	ALTITUDE (M)	DESCRIÇÃO GERAL
P1	Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico	7°21'36.78"S 36°15'56.55"W	523	Perfil situado no topo da encosta rochosa (summit). O solo é bem drenado, com leve erosão laminar e derivado do granitoide autóctone. O solo está ligeiramente coberto por serrapilheira. Predominam Bromelia laciniosa, Pilosocereus pachycladus, e Sida galheirensis. Ocorrência de horizonte A moderado (SiBCS).
P2	Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico	7°21'37.26"S 36°15'52.96"W	504	Perfil em gnamma localizada no terço médio da encosta rochosa (backslope). O solo é bem drenado, sem erosão aparente e derivado de colúvio granitoide autóctone. O solo é coberto por serrapilheira. Croton blanchetianus, Handroanthus impetiginosus e Zanthoxylum rhoifolium predominam. Ocorrência do horizonte úmbrico (WRB), do horizonte O hístico e do horizonte A húmico (SiBCS).
P3	Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico	7°21'36.08"S 36°15'48.32"W	487	Perfil na base da uma encosta rochosa (toeslope). Solo bem drenado, sem erosão aparente e derivado de colúvio granitoide autóctone. O solo é coberto por serrapilheira com espessura de até 5 cm. Predominam Colicodendron yco, Croton blanchetianus, Hymenaea rubriflora, Myrcia tomentosa e Myroxylon peruiferum. Ocorrência do horizonte úmbrico (WRB), do horizonte O hístico e do horizonte A moderado (SiBCS).

LEGENDA: WRB: World Reference Base Soil Resources. SiBCS: Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos.

A profundidade dos perfis variou entre 55 e 115+ cm (Tabela 2). A transição dominante entre os horizontes é plana e clara, exceto nos caso dos horizontes superficiais de P1 e P2 que são abruptas. A sequência de horizontes é A sobre C. As cores variam de mais escuras nos horizontes superficiais (preto) a mais amareladas (bruno-oliváceo) com o aumento da profundidade, indicando melanização (Tabela 2). Horizontes O hísticos foram observados no terço médio e na base da encosta (P2 e P3), indicando maior acúmulo de material orgânico nas posições mais rebaixadas do relevo (Tabela 2).



TABELA 2 - Propriedades morfológica dos solos.

Hor.	Prof. (cm)	Transição	Cor úmida	Estrutura	Consistência	Cascalho	Poros	Raízes
P1 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico								
A1	0-2	pl - ab	2.5Y 2.5/1	frc, 2-3, bsa	ldr, frl, npg, npl	cas	pc, 1-2, irr, tub	pc, 1
A2	2-10	pl - cl	2.5Y 3/1	frc, 2-3, bsa	mc, frl, npg, npl	cas	cm, 1-2, tub	pc, 3, ab, 1-2
CA	10-25	pl - cl	2.5Y 4/3	mod, 2-3, bsa	mc, frl, npg, npl	cas	ab, 1-2, irr, tub	cm, 1-2
CR	25-55+		2.5Y 3/3	mod, 2-3, bsa	mc, frl, lpg, lpl	cas	cm, 1-2, irr, tub	cm, 1-2
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico								
Od	0-5	pl - ab	5Y 1/1	frc, 2-3, gru	-, frl, npg, npl	pc	cm, 2-3, tub, det-tub	ab, 1-2-3
2A1	5-25	pl - cl	5Y 2/1	frc, 3, gra	-, frl, npg, npl	pc	pc, 3, tub	ab, 1-2-3-5
2A2	25-55	pl - cl	5Y 2.5/2	mod, 2-3, bsa	-, frl, npg, npl	cas	cm, 2-3, tub	ab, 1-2-3
2AC	55-75	pl - cl	5Y 3/2	mod, 2-3-4, bsa	-, frl, npg, lpl	pc	ab, 1-2, tub, pla	ab, 1-2
2C	75-95+		2.5Y 4/4	mod, 2-3, bsa	-, frl, npg, lpl	cas	cm, 2-3, irr, tub	cm, 1-2
P3 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico								
Od	0-10	pl - cl	5Y 1/1	mod, 2-3, gru	-, frl, npg, npl	pc	aus, 3-4, tub, det-tub	ab, 1-2-3-4
2A	10-32	pl - cl	5Y 1/1	frc, 2-3, gra, bsa	-, frl, npg, npl	pc	cm, 3-4, tub	ab, 1-2-3
2AC	32-50	pl - cl	5Y 1/1	frc, 2-3, grd, bsa	-, frl, npg, lpl	cas	pc, 1-2-3, tub	ab, 1-2
3Ab	50-65	pl - cl	5Y 2/1	mod, 2-3, bsa	-, frl, npg, lpl	cas	cm, 1-2 pq, tub	ab, 1-2-3
3Cr1	65-90	pl - cl	5Y 3/2	frc, 2-3, bsa	-, frl, npg, npl	cas	cm, 2-3, irr	cm, 1-2
3Cr2	90-115+		5Y 2.5/2	frc, 3-4, bsa	-, frl, npg, lpl	cas	cm, 2-3, irr, pla	pc, 1-2

LEGENDA: Hor.: Horizontes. Prof.: Profundidade. Transição: Topografia; pl = plana. Contraste; ab = abrupta, cl = clara. Estrutura: Grau; 1 = fraca, mod = moderada. Tamanho; 1 = muito pequena, 2 = pequena, 3 = média, 4 = grande. Tipo; gra = granular, gru = grumosa, bsa = blocos subangulares. Consistência: Seca; mc = macia, ldr = ligeiramente dura. Úmida; frl = friável. Molhada – Pegajosidade; npg = não pegajosa, lpg = ligeiramente pegajosa. Molhada – Plasticidade; npl = não plástica, lpl = ligeiramente plástica. Cascalho: pc = pouco cascalhento, cas = cascalhento. Poros: Tamanho; 1 = muito pequenos, 2 = pequenos, 3 = médios, 4 = grandes. Quantidade; pc = poucos, cm = comuns, ab = abundantes. Tipos; det = dendrítico, int = intersticiais, irr = irregulares, pla = planares, ves = vesiculares, tub = tubulares. Raízes: Quantidade; pc = poucas, cm = comuns, ab = abundantes. Tamanho; 1 = muito finas, 2 = finas, 3 = médias, 4 = grossas, 5 = muito grossas.

A estrutura variou de fraca a moderada de tamanho médio dos tipos granular, grumosa e subangulares (Tabela 2). A consistência do material seco variou entre macia e ligeiramente dura e o material úmido apresentou consistência friável, predominantemente não pegajosa, não plástica nos horizontes superficiais e plástica nos subsuperficiais (Tabela 2). Os solos são basicamente cascalhentos, com exceção dos horizontes superficiais do P2 e P3. Os poros variaram de ausentes a abundantes, de tamanho muito pequeno a grandes e dos tipos dendrítico, irregulares e tubulares (Tabela 2). A predominância de poros tubulares e, em menor extensão, de poros dendríticos sugere bioturbação generalizada. As raízes foram poucas e comuns em P1 e comuns e abundantes em P2 e P3, onde ocorrem espécies de Mata Atlântica e Floresta Estacional Semidecidual.



A textura dos solos é dominada pela fração areia grossa, em média, representando cerca de 52% de sua composição (Tabela 3). Os solos apresentam majoritariamente uma classificação textural de Franco-Argilo-Arenosa, exceto nos horizontes superficiais do P1 (A1 e A2) e no horizonte subsuperficial do P3 (3Ab). No P1, o teor de argila aumentou conforme a profundidade do perfil. Por outro lado, os perfis P2 e P3 evidenciaram maiores teores de argila em seus horizontes superficiais (Tabela 3). Variações nas razões granulométricas sugerem descontinuidade lítica entre horizontes, indicando que os materiais que formam esses solos são autóctones e alóctones (Tabela 3). As descontinuidades líticas foram registradas entre 5 cm e 115 cm de profundidade, indicando contribuições frequentes. Apenas um horizonte enterrado foi encontrado na posição mais rebaixada da encosta rochosa (3Ab do P3).

TABELA 3 - Propriedades físicas dos solos.

Hor.	Prof. (cm)	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	AG/AF	AG+AF/Silte	Silte/Argila	Classificação Textural
----- % -----									
P1 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico									
A1	0-2	66,2	12,9	7,7	13,2	5,13	10,27	0,58	Franco-Arenosa
A2	2-10	64,4	13,9	9,0	12,7	4,63	8,70	0,71	Franco-Arenosa
CA	10-25	56,3	15,0	8,2	20,5	3,75	8,70	0,40	Franco-Argilo-Arenosa
CR	25-55+	48,6	14,6	11,4	25,4	3,33	5,54	0,45	Franco-Argilo-Arenosa
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico									
Od	0-5	45,0	9,4	16,9	28,8	4,79	3,22	0,59	Franco-Argilo-Arenosa
2A1	5-25	52,3	10,6	13,0	24,1	4,93	4,84	0,54	Franco-Argilo-Arenosa
2A2	25-55	50,3	12,9	13,1	23,7	3,90	4,82	0,55	Franco-Argilo-Arenosa
2AC	55-75	51,1	14,6	11,8	22,4	3,50	5,57	0,53	Franco-Argilo-Arenosa
2C	75-95+	49,6	14,3	13,5	22,6	3,47	4,73	0,60	Franco-Argilo-Arenosa
P3 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico									
Od	0-10	37,0	10,4	18,3	34,3	3,56	2,59	0,53	Franco-Argilo-Arenosa
2A	10-32	49,3	16,0	12,4	22,3	3,08	5,27	0,56	Franco-Argilo-Arenosa
2AC	32-50	54,1	12,1	12,4	21,3	4,47	5,34	0,58	Franco-Argilo-Arenosa
3Ab	50-65	56,4	11,7	14,3	17,5	4,82	4,76	0,82	Franco-Arenosa
3Cr1	65-90	49,8	8,7	20,1	21,4	5,72	2,91	0,94	Franco-Argilo-Arenosa
3Cr2	90-115+	50,4	10,4	18,7	20,5	4,85	3,25	0,91	Franco-Argilo-Arenosa

LEGENDA: Hor.: Horizonte. Prof.: Profundidade. AG: Areia grossa. AF: Areia fina.

Os solos variaram de extremamente ácido a neutro (4,27 a 6,71). A acidez trocável (H + Al) aumenta nos perfis de solo em posições mais rebaixadas do relevo (P2 e P3), e variou de 17,50 e 1,40 cmol_c/dm³. O ΔpH é negativo para todo o conjunto amostral. Da mesma forma, a soma de bases (SB), a capacidade efetiva de troca catiônica (t), a



capacidade de troca catiônica (T), o carbono orgânico do solo (C) e o nitrogênio total (N) diminuem com o aumento da profundidade, indicando que as propriedades químicas do solo estão diretamente associadas a matéria orgânica do solo.

Os solos são distróficos, apresentando uma saturação por bases (V) predominantemente menor que 50%, exceto nos horizontes superficiais A1 e A2 do P1 e Od do P3 que ultrapassaram esse limite. (Tabela 4). O fósforo remanescente (P_{REM}) variou de 5,4 a 46,3 mg L⁻¹ (Tabela 4). Os valores P_{REM} abaixo de 20 mg L⁻¹, nos perfis P2 e P3, sugerem alta capacidade de adsorção de P em horizontes subsuperficiais associados a um estágio avançado de intemperismo e pedogênese. O contrário é observado no perfil P1, onde os altos valores de P_{REM} (média de 43,5 mg L⁻¹) indicam baixa capacidade de retenção de P.

A abundância de cátions trocáveis no complexo de troca decresceu na ordem de $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ de ambos os perfis (Tabela 4). Os teores de C e N no solo reduziram conforme a profundidade dos perfis, estiveram melhor representados nos horizontes superficiais e variaram de 0,40 a 18,96 e 0,04 a 0,87 dag/kg, respectivamente (Tabela 4). O P variou entre 28,6 e 1,3 mg/dm³ com seus maiores teores quantificados nos horizontes superficiais de P1 e P3, reduzindo em profundidade (Tabela 4).



TABELA 4 - Estoques totais de C orgânico, N total e P biodisponível nos solos.

Hor.	Prof. (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P	K+	Na+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ₃₊	H+ Al	SB	t	T	V	m	ISNa	C	N	C/N	PREM mg L ⁻¹
					--- mg/dm ³ ---	----- mg/dm ³ -----						----- % -----			-- dag/kg --						
P1 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico																					
A1	0-2	6,71	6,02	-0,69	28,1	112	20,74	3,58	5,13	10,27	1,4	5,97	5,97	7,37	81,0	0,0	1,21	1,98	0,11	17,50	46,3
A2	2-10	6,27	5,29	-0,98	11,7	77	20,15	2,67	4,63	8,70	3,0	4,53	4,53	7,53	60,2	0,0	1,16	1,10	0,09	12,81	45,8
CA	10-25	4,57	3,40	-1,17	3,9	52	16,47	0,59	3,75	8,70	5,5	1,16	2,56	6,66	17,4	54,7	1,08	1,13	0,07	15,21	42,0
CR	25-55+	4,58	3,37	-1,21	2,2	42	17,48	0,68	3,33	5,54	5,4	1,20	2,87	6,60	18,2	58,2	1,15	1,05	0,07	14,79	39,8
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																					
Od	0-5	4,97	3,67	-1,30	16,3	173	38,48	3,56	4,79	3,22	17,5	5,58	6,23	23,08	24,2	10,4	0,72	18,96	0,87	21,84	28,3
2A1	5-25	4,46	3,50	-0,96	4,5	54	21,89	0,54	4,93	4,84	14,8	0,99	3,10	15,79	6,3	68,1	0,60	5,32	0,41	13,04	20,4
2A2	25-55	4,44	3,77	-0,67	1,6	28	21,94	0,05	3,90	4,82	11,8	0,27	2,52	12,07	2,2	89,3	0,79	3,00	0,19	15,37	6,9
2AC	55-75	4,80	4,06	-0,74	1,5	13	15,54	0,04	3,50	5,57	7,6	0,16	1,33	7,76	2,1	88,0	0,87	1,57	0,14	11,47	4,2
2C	75-95+	4,90	4,14	-0,76	1,3	12	16,08	0,03	3,47	4,73	5,9	0,16	1,08	6,06	2,6	85,2	1,15	1,00	0,11	8,80	4,0
P3 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico																					
Od	0-10	5,27	4,24	-1,03	28,6	615	34,74	6,96	3,56	2,59	10,6	11,80	11,86	22,40	52,7	0,5	0,67	8,02	0,44	18,18	32,5
2A	10-32	4,82	3,73	-1,09	6,3	365	39,35	1,78	3,08	5,27	9,4	3,57	4,74	12,97	27,5	24,7	1,32	2,83	0,18	15,72	23,0
2AC	32-50	4,27	3,45	-0,82	1,4	68	65,52	0,20	4,47	5,34	10,0	0,78	3,51	10,78	7,2	77,8	2,64	1,15	0,12	9,46	20,4
3Ab	50-65	4,77	3,59	-1,18	2,0	59	52,70	0,17	4,82	4,76	9,7	0,68	3,62	10,38	6,6	81,2	2,21	1,41	0,11	12,36	11,8
3Cr1	65-90	5,27	3,77	-1,50	2,5	26	52,22	0,07	5,72	2,91	7,4	0,46	2,75	7,86	5,9	83,3	2,89	0,42	0,07	5,97	5,4
3Cr2	90-115+	5,27	3,67	-1,58	1,6	22	49,31	0,05	4,85	3,25	5,3	0,45	2,87	5,75	7,8	84,3	3,73	0,40	0,04	9,31	11,0

LEGENDA: Hor.: Horizontes. Prof.: Profundidade.



Os perfis de solo apresentaram valores de densidade de partículas (DP) variando de 2,38 a 2,60 g cm⁻³, com média de 2,5 g cm⁻³ (Tabela 5). Esses resultados se aproximam da densidade relativa do quartzo (2,5 a 2,8 g cm⁻³) e do feldspato (2,5 a 2,6 g cm⁻³). Os valores de densidade do solo (DS) variaram entre 0,93 e 1,43 g cm⁻³, com média de 1,2 g cm⁻³. Isso provavelmente está ligado à diferenciação na constituição textural dos horizontes do solo amostrados. Valores de DS acima de 1,30 g cm⁻³ sugerem horizontes arenosos, como no caso do P1. Valores de DS abaixo de 1,30 g cm⁻³ indicam horizontes ricos em matéria orgânica, como observados nos perfis P2 e P3 (Tabela 5).

TABELA 5 - Estoques totais de C orgânico, N total e P biodisponível nos solos.

Hor.	Prof. (cm)	C g/kg	N g/kg	P**	DP g/cm ³	DS	PT %	Estoques totais		
								C	N	P**
Mg ha ⁻¹										
P1 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico										
A1+A2	0-10*	19,8	1,1	0,028	2,60	1,41	46	27,9	4,4	0,008
CA	10-25	11,3	0,9	0,012	2,60	1,43	45	24,1	8,8	0,011
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico										
Od	0-5	189,6	8,7	0,016	2,47	1,02	59	96,7	4,4	0,008
2A1	5-25	53,2	4,1	0,005	2,44	1,08	56	114,9	8,8	0,011
P3 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico										
Od	0-10	80,2	4,4	0,029	2,38	0,93	61	74,6	4,1	0,027
2A	10-32	28,3	5,4	0,006	2,56	1,38	46	85,9	16,4	0,018
Média	Superficial (3)	96,5	4,7	0,024	2,5	1,1	55,3	66,4	4,3	0,014
	Subsuperficial (3)	30,9	3,5	0,009	2,5	1,3	49,0	75,0	11,3	0,013
	Todos (6)	63,7	4,1	0,018	2,5	1,2	52,2	70,7	7,8	0,014
CV%	Superficial (3)	89,2	80,5	29,7	4,5	22,8	14,7	52,9	4,0	76,5
	Subsuperficial (3)	68,1	66,8	47,1	3,3	14,6	12,4	61,9	38,7	30,3
	Todos (6)	104,5	70,8	55,3	3,7	18,5	14,0	52,5	60,8	53,6

LEGENDA: Hor.: Horizontes. Prof.: Profundidade. **C:** Carbono orgânico. **N:** Nitrogênio total. **P:** Fósforo biodisponível. **DP:** Densidade de partículas. **DS:** Densidade do solo. **PT:** Porosidade total. *Horizontes adicionados. **Fósforo biodisponível extraído por Mehlich-1. CV%: Coeficiente de variação.

Nos horizontes superficiais, o teor de C orgânico variou de 1,98 a 18,96 dak/kg. O teor de N variou entre 0,04 e 0,87 dak/kg. A relação C/N desses horizontes variou de 5,97 a 21,84 (Tabela 4). Em relação aos estoques totais de C e N, observou-se que o P2 contou com a maior quantidade de C estocado (média de 105,8 Mg ha⁻¹) em relação aos demais perfis (Tabela 5). Todavia, a maior quantidade de N esteve estocada no horizonte 2A do P3 (16,4 Mg ha⁻¹). O P biodisponível apresentou os maiores valores no P3, onde localiza-se o componente arbóreo mais adensado e a maior ocorrência de espécies de áreas úmidas (Tabela 1 e 4).



A vegetação variou desde espécies endêmicas que ocorrem na Caatinga (*stricto sensu*) à espécies do Cerrado e Mata Atlântica, até aquelas que são amplamente distribuídas em outros domínios fitogeográficos do Brasil (Tabela 6).

TABELA 6 – Cobertura vegetal dos perfis de solo.

Famílias	Nome popular	Nome científico	Hábitos	DFG	EDB	Origem	Perfis
Fabaceae	Cumaru-de-cheiro/ Umburana de cheiro	<i>Amburana cearensis</i>	Árvore	CAA, CER, MAT, PAN	NÃO	Nativa	P3
Fabaceae	Angico	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, MAT	NÃO	Nativa	P3
Apocynaceae	Pereiro	<i>Aspidosperma pyriforme</i>	Árvore	CAA, CER	NÃO	Nativa	P3
Anacardiaceae	Aroeira	<i>Astronium urundeuva</i>	Árvore	CAA, CER, MAT, PAM, PAN	NÃO	Nativa	P3
Fabaceae	Mororó/Pata de Vaca	<i>Bauhinia cheilantha</i>	Arbusto, Árvore	CAA, CER	NÃO	Nativa	P3
Bromeliaceae	Macambira	<i>Bromelia laciniosa</i>	Erva	CAA	SIM	Nativa	P1 e P3
Myrtaceae	Guabiroba/Gabiroba	<i>Campomanesia eugenioides</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, MAT	SIM	Nativa	P3
Malvaceae	Barriguda	<i>Ceiba glaziovii</i>	Árvore	CAA	SIM	Nativa	P3
Fabaceae	Catingueira	<i>Cenostigma nordestinum</i>	Arbusto, árvore	CAA	SIM	Nativa	P3
Fabaceae	Jurema Branca	<i>Chloroleucon dumosum</i>	Árvore	CAA, CER, MAT	SIM	Nativa	P3
Euphorbiaceae	Urtiga	<i>Cnidioscolus urens</i>	Arbusto, erva, subarbusto	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Bixaceae	Pacotê	<i>Cochlospermum vitifolium</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Capparaceae	Icó	<i>Colicodendron yco</i>	Arbusto	CAA	SIM	Nativa	P3
Combretaceae	Cipaúba	<i>Combretum glaucocarpum</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Burseraceae	Imburana/Amburana/ Umburana	<i>Commiphora leptophloeos</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, FAM	NÃO	Nativa	P3
Arecaceae	Carnaúba	<i>Copernicia prunifera</i>	Palmeira	CAA, CER	SIM	Nativa	P3
Rubiaceae	Puruna Peba Pilosa	<i>Cordia rigida</i>	Arbusto, subarbusto	CAA, CER	SIM	Nativa	P3
Euphorbiaceae	Marmeleiro	<i>Croton blanchetianus</i>	Arbusto, árvore	CAA	SIM	Nativa	P1, P2 e P3
Capparaceae	Feijão-bravo	<i>Cynophalla flexuosa</i>	Arbusto	CAA, CER, FAM, MAT, PAN	NÃO	Nativa	P1 e P3
Euphorbiaceae		<i>Argythamnia desertorum</i>	Arbusto	CAA	SIM	Nativa	P3
Erythroxylaceae	Galinha-choca/ Mercúrio-do-campo	<i>Erythroxylum suberosum</i>	Arbusto, árvore, subarbusto	CER, FAM	NÃO	Nativa	P3
Myrtaceae		<i>Eugenia sp 2*</i>		CAA, CER, MAT		Nativa	P3
Myrtaceae		<i>Eugenia sp3*</i>		CAA, CER, MAT		Nativa	P3
Euphorbiaceae		<i>Euphorbia phosphorea</i>	Arbusto	CAA	SIM	Nativa	P1
Nyctaginaceae	Guapira	<i>Guapira sp*</i>	Arbusto, árvore, subarbusto	CAA, CER, FAM, MAT, PAN	NÃO	Nativa	P3
Famílias	Nome popular	Nome científico	Hábitos	DFG	EDB	Origem	Perfis
Rubiaceae	Angélica	<i>Guettarda angelica</i>	Arbusto, árvore	CAA	SIM	Nativa	P3



Bignoniaceae	Ipê Roxo	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Árvore	CAA, CER, FAM, MAT, PAN	NÃO	Nativa	P2 e P3
Fabaceae	Jatobá/Tamarindo	<i>Hymenaea rubriflora</i>	Arbusto, árvore	MAT	SIM	Nativa	P3
Fabaceae	Ingá	<i>Inga edulis</i>	Árvore	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Euphorbiaceae	Pinhão Bravo	<i>Jatropha mollissima</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, FAM	NÃO	Nativa	P3
Fabaceae	Pau Ferro	<i>Libidibia leiostachya</i>	Árvore	MAT, CAA	SIM	Nativa	P3
Verbenaceae	Alecrim Bravo	<i>Lippia grata</i>	Arbusto	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P1
Fabaceae	Pau Mocê	<i>Luetzelburgia auriculata</i>	Árvore	CAA, CER, FAM	SIM	Nativa	P3
Cactaceae	Coroa-de-frade	<i>Melocactus zehntneri</i>	Subarbusto, suculenta	CAA, CER	SIM	Nativa	P1
Fabaceae	Jurema Vermelha	<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	Arbusto, árvore	CAA	SIM	Nativa	P3
Fabaceae	Jurema	<i>Mimosa paraibana</i>	Arbusto	CAA, MAT	SIM	Nativa	P3
Celastraceae	Bom-nome	<i>Monteverdia rigida</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER	SIM	Nativa	P3
Myrtaceae	Guamirim-ferro	<i>Myrcia neolucida</i>	Árvore	CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Myrtaceae	Araçazinho	<i>Myrcia tomentosa</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Fabaceae	Balsamo	<i>Myroxylon peruiferum</i>	Árvore	CER, MAT	NÃO	Nativa	P3
Cactaceae	Facheiro	<i>Pilosocereus pachycladus</i>	Arbusto, árvore, suculenta	CAA, CER	SIM	Nativa	P3
Myrtaceae	Jaboticaba	<i>Plinia grandifolia</i>	Árvore	MAT	SIM	Nativa	P3
Rhamnaceae		<i>Rhamnidium molle</i>	Arbusto, árvore	CAA	SIM	Nativa	P3
Anacardiaceae	Baraúna	<i>Schinopsis brasiliensis</i>	Árvore	CAA, CER	NÃO	Nativa	P3
Euphorbiaceae	Purga-de-leite	<i>Sebastiania macrocarpa</i>	Arbusto, árvore	CAA	SIM	Nativa	P3
Malvaceae	Malva amarela	<i>Sida galheirensis</i>	Subarbusto	CAA, CER, MAT	SIM	Nativa	P1
Sapotaceae	Quixabeira	<i>Sideroxylon obtusifolium</i>	Arbusto, árvore	CAA, CER, MAT, PAN	NÃO	Nativa	P3
Arecaceae	Catole	<i>Syagrus cearensis</i>	Palmeira	CAA, MAT	SIM	Nativa	P3
Cactaceae	Palmatória sem espinho	<i>Tacinga inamoena</i>	Subarbusto, suculenta	CAA	SIM	Nativa	P1 e P3
Cactaceae	Palmatória de espinho	<i>Tacinga palmadora</i>	Arbusto, subarbusto, suculenta	CAA	SIM	Nativa	P1 e P3
Sapindaceae	Pitombeira	<i>Talisia esculenta</i>	Árvore	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Rubiaceae	Guamarú	<i>Tocoyena formosa</i>	Árvore, subarbusto	CAA, CER, FAM, MAT	NÃO	Nativa	P3
Turneraceae	Malva	<i>Turnera cearensis</i>	Arbusto, subarbusto	CAA, MAT	SIM	Nativa	P3
Boraginaceae	Erva-baleeira	<i>Varronia curassavica</i>	Arbusto	CAA, CER, FAM, MAT, PAM	NÃO	Nativa	P3
Cactaceae	Xique-xique	<i>Xiquexique gounellei</i>	Arbusto, suculenta	CAA, CER	SIM	Nativa	P1 e P3
Rutaceae	Mamica de Porca	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	Árvore	CAA, CER, FAM, MAT, PAM, PAN	NÃO	Nativa	P2 e P3

LEGENDA:* Apenas o gênero identificado. DFG: Domínios Fitogeográficos. EDB: Endemismo no Brasil. CAA: Caatinga. CER: Cerrado. FAM: Floresta Amazônica. MAT: Mata Atlântica. PAM: Pampa. PAN: Pantanal. Verde claro: Espécies que demandam mais água e não são nativas da Caatinga. Amarelo: As espécies nativas da Caatinga que mais demandam água. Laranja: Quando dominantes, essas espécies são indicativas de ambientes em processo de degradação/antropização.



No total foram registradas 56 espécies situadas sobre os perfis de solo. As famílias mais abundantes foram: Fabaceae (10), Euphorbiaceae - Myrtaceae (6) e Cactaceae (5). Os hábitos arbustivos e arbóreos sobressaíram aos demais. No P3 foi observado a maior riqueza de espécies, seguido de P1 e P2. Nos perfis P1 e P3 ocorreu a maior parte das espécies endêmicas da Caatinga. P3 deteve o maior número de espécies que ocorrem comumente na Caatinga e Cerrado e espécies típicas de domínios úmidos como *Hymenaea rubriflora* e *Plinia grandifolia* que normalmente são encontradas na Mata Atlântica (Tabela 6).

DISCUSSÃO

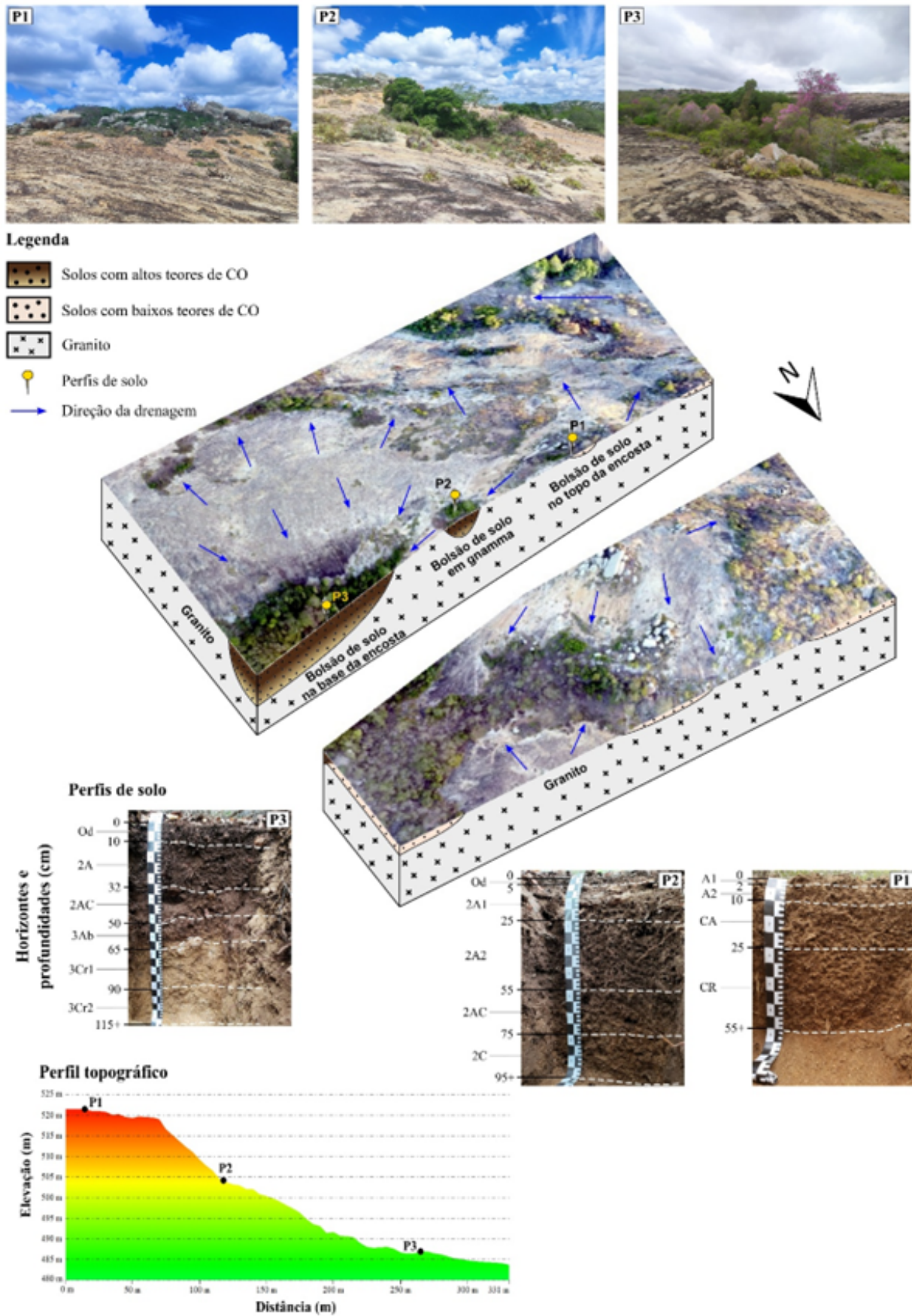
Os solos analisados em bolsões incrustados nas encostas rochosas de inselbergs graníticos na Caatinga representam “ilhas edáficas” complexas, sustentando mosaicos paisagísticos que contrastam com aqueles comumente observados nas áreas sem influência dessas formas de relevo (Figura 2). Além disso, eles evidenciam um gradiente pedogenético e ecológico, associado à posição geomórfica e a dinâmica de erosão e transporte superficial de água, sedimentos e resíduos orgânicos. A distinção entre os perfis P1 (topo), P2 (terço médio) e P3 (base) reflete a influência combinada de processos geomorfológicos superficiais, intemperismo e atividade biológica, na intensificação da pedogênese dos solos situados nas posições mais rebaixadas (P2 e P3).

Os perfis P2 e P3, situados no terço médio e na base da encosta, respectivamente, apresentam pedogênese mais avançada que o P1. Sua maior espessura, horizontes hísticos e cores escuras (melanização) indicam acúmulo de matéria orgânica da serrapilheira (Conforti et al., 2016). Esse processo é provavelmente favorecido pela cobertura vegetal mais adensada com exemplares de Mata Atlântica e Floresta Estacional Semidecidual, que aporta maior quantidade de biomassa (Machado et al., 2019). Esses processos são amplificados pelo escoamento superficial das posições mais elevadas do relevo, que contribui para a formação de horizontes descontínuos e enterrados (Tabela 2).

A maior acumulação de serrapilheira nesses solos ainda promove a formação de horizontes superficiais orgânicos (Od). Em contrapartida, o P1, localizado no topo da encosta, comporta solos rasos, arenosos e com teores reduzidos de CO, refletindo condições ambientais mais susceptíveis a erosão, além de maior restrição na retenção hídrica e aporte de sedimentos e resíduos biogênicos. A distinção textural, com aumento de argila em profundidade no P1 e maior teor superficial nos P2 e P3, reforça a influência da posição topográfica na dinâmica de intemperismo e transporte de sedimentos (Lunguinho, 2018).



FIGURA 2 - Representação esquemática da área de estudo.



FONTE: Elaboração própria (2025).



Os elevados teores de CO (até 18,96 dag/kg) e N (até 0,87 dag/kg) nos horizontes superficiais de P2 e P3 destacam o papel desses bolsões como sumidouros de CO na Caatinga, onde os solos são predominantemente pobres em CO e raramente ultrapassam os 0,6 dag/kg (Araujo Filho et al., 2023). A relação C/N variável (5,97 a 21,84) reflete diferentes estágios de decomposição da MOS, com os menores valores observados com o aumento da profundidade, principalmente no P3, sugerindo uma maior humificação (Rumpel; Kögel-Knabner, 2011).

A densidade do solo ($DS < 1,30 \text{ g cm}^{-3}$) nesses perfis, associada à alta porosidade tubular e bioturbação generalizada, confirma a influência da matéria orgânica na estruturação do solo, facilitando a infiltração de água e a atividade biológica (Lal, 2020; Murphy, 2015). Em contrapartida, o P1, com DS superior a $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ e P_{REM} elevado ($43,5 \text{ mg L}^{-1}$), representa um ambiente menos intemperizado, com menor capacidade de retenção de nutrientes, característico de solos jovens e sujeitos à perda de materiais finos (Borges Neto et al., 2023; Galindo et al., 2008).

A ocorrência de espécies de Mata Atlântica e de Florestas Semidecíduais nos bolsões de solo do inselberg ressalta o papel dessas ilhas edáficas como refúgios microclimáticos em regiões semiáridas (Borges Neto et al., 2025; Keppel et al., 2012; Vanschoenwinkel et al., 2025). Esses ambientes funcionam como *hotspots* de biodiversidade, sustentando comunidades vegetais que dependem de solos mais profundos e com maior disponibilidade hídrica (Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Schut et al., 2014; Salvador et al., 2023). Além disso, o estoque significativo de carbono orgânico (até $105,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ em P2) evidencia o potencial desses solos no sequestro de carbono, destacando sua relevância para iniciativas de restauração e mitigação das mudanças climáticas em regiões secas (Oliveira Filho et al., 2024; Souza et al., 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os bolsões de solo em inselbergs na Caatinga representam sistemas pedogeomorfológicos singulares, onde a interação entre relevo, material parental e vegetação promove a formação de solos com características pedogenéticas e edáficas distintas do contexto paisagístico circundante. Esses ambientes não apenas abrigam espécies de biomas mais úmidos, mas também atuam como “portadores de informações”, registrando processos paleoambientais. Portanto, sua preservação é indispensável para a manutenção da biodiversidade e ao entendimento da resiliência ecossistêmica em paisagens semiáridas.



Agradecimentos:

Gostaríamos de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado do primeiro autor Nº88887.616334/2021-00. Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná (PPGGEO-UFPR). A parceria construída entre os autores e suas respectivas instituições e grupos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, G. B.; OLIVEIRA, F. S. de.; SILVA, A. H. N. da.; SOUZA JUNIOR, V. S. de. Toposequence: What are we talking about? *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 48, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20230137>
- BORGES NETO, I. de O.; SANTOS, L. J. C.; SOUZA, J. L. L. de; SOUZA, B. I. de; XAVIER, R. A.; SALVADOR, M. do S. S.; LIMA, V. R. P. de. Literature Review of Relief-Soil-Plant Interaction in Rock Outcrops. *Sociedade & Natureza*, v. 37, n. 1, 2025. <https://doi.org/10.14393/SN-v37-2025-75884>
- BORGES NETO, I. O.; XAVIER, R. A.; SOUZA, B. I.; SANTOS, L. J. C.; SOARES, D. A.; SOUZA, J. J. L. L. Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 48, n. 9, p. 1712-1723, 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5581>.
- CONFORTI, M.; LUCÀ, F.; SCARCIGLIA, F.; MATTEUCCI, G.; BUTTAFUOCO, G. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena*, v. 144, p. 23-33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.023>.
- CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. de A.; CAVALCANTI, L. C. de S.; LIRA, D. R. de. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, v. 31, n. 1-2, p. 35-52, 2010. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20100003>
- COUTO, D. R.; DAN, M. L.; AGUIAR, W. M.; BRAGA, J. M. A.; NASCIMENTO, M. T. Floristic composition, structure and species-area relationships on a neotropical inselberg in southeastern Brazil. *Rodriguésia*, v. 72, 2021. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202172114>
- FILGUEIRAS, T. S.; BROCHADO, A. L.; NOGUEIRA, P. E.; GUALA II, G. F. Caminhamento – um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos. *Cadernos de Geociências*, v. 2, n. 4, p. 39-43, 1994. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/116/cgeo_1994_n12_out_dez.pdf. **Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> >. Acesso em: 18 fev. 2025
- GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANOTS, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 1283-1296, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300036>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências > informacoes_ambientais > pedologia em escala de 1:250.000**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 3ª Ed. Manuais Técnicos em Geociências, nº.4, Rio de Janeiro, 2015, 430p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=295017&view=detalhes>. Acesso em: 4 mar. 2025.



IUSS Working Group WRB. **World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.** 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022.

KEPPEL, G.; VAN NIEL, K. P.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; BYRNE, M.; MUCINA, L.; SCHUT, A. G. T.; HOPPER, S. D.; FRANKLIN, S. E. Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, p. 393-404, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x>

LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>.

LUNGUINHO, R. L. **Nos caminhos dos Relevos Residuais: Contribuição a Ecohidrologia de Encostas no Semiárido Brasileiro.** 2018. 266 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13602>

MACHADO, D. L.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, L. L. dos; DINIZ, A. R.; GUARESCHI, R. F. Organic matter and soil fertility in different successional stages of seasonal semideciduous forest. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 1, p. 179-188, 2019. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n118rc>

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R.; NASCIMENTO, M. A. L.; CASTRO, H. S. de; MEIRELES, A. J. de A.; ROTHIS, L. M. Geomorfologia do campo de Inselbergues de Quixadá, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 2, 2015. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i2.651>

MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1295>

MORO, M. F.; AMORIM, V. O.; QUEIROZ, L. P.; COSTA, L. R. F.; MAIA, R. P.; TAYLOR, N. P.; ZAPPI, D. C. Biogeographical districts of the Caatinga dominion: a proposal based on geomorphology and endemism. **The Botanical Review**, v. 90, n. 4, p. 376-429, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12229-024-09304-5>

MURPHY, B. W. Impact of soil organic matter on soil properties - a review with emphasis on Australian soils. **Soil Research**, v. 53, n. 6, p. 605-635, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14246>.

MUSIELOK, Ł.; BUCZEK, K.; KARCZ, T. Relief-induced feedback mechanisms controlling local podzolization occurrence on flysch slopes – Examples from Outer Western Carpathians (southern Poland). **Catena**, v. 213, 106124, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106124>

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V.; LIMA, P. P. S. Análise temporal da degradação da Caatinga na Sub-Bacia do Alto Paraíba. **OKARA**, v. 8, n.1, p. 72–93, 2014.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; DINIZ, R. S. N.; SILVA, R. C.; MOREIRA, V. O. G.; VIEIRA, J. M.; BARRETO, M. M. S.; CARVALHO, M. S. B. S.; TRITSCH, I.; SCOPEL, E. Carbon and nitrogen stocks in Lithic soils: Environmental drivers and land-use implication in Brazilian dry ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, n. 4, p. 1476-1488, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03732-x>

OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C.; CALEGARI, M. R. Relação solo-relevo em sistema pedológico Argissolo-Neossolo quartzarênico na região noroeste do estado do Paraná: Caso de Amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1786>

OTTAVIANI, G.; MARCANTONIO, M.; MUCINA, L. Soil depth shapes plant functional diversity in granite outcrops vegetation of Southwestern Australia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 9, n. 3, p. 263-276, 2016. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1211192>

PALOSCHI, R. A.; RAMOS, D. M.; VENTURA, D. J.; SOUZA, R.; SOUZA, E.; MORELLATO, L. P. C.; NÓBREGA, R. L. B.; COUTINHO, Í. A. C.; VERHOEF, A.; KÖRTING, T. S.; BORMA, L. S. Environmental Drivers of Water Use for Caatinga Woody Plant Species: Combining Remote Sensing Phenology and Sap Flow Measurements. **Remote Sensing**, v. 13, n. 75. p.18. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13010075>.

PÉREZ, F. L. Geocology of a granite dome: Spatial interactions between gnammas, rills, soils, and plant cover, Enchanted Rock (Texas, USA). **Catena**, v. 223, 106938, 2023: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106938>



- RANULPHO, R.; ASFORA, V. K.; FAMBRINI, G. L.; OLIVEIRA, E. V.; SILVA, J. L. L. da; CORRÊA, M. M.; MORAES, A. S.; SILVA, Y. J. A. B. da; SOUZA NETO, J. A. de; NEUMANN, V. H. M. L. A paleosol identified by optically stimulated luminescence dating in the excavation of a tank in agreste of pernambuco state, NE Brazil. **Brazilian journal of physics**, v. 54, n. 5, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13538-024-01510-1>
- RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter - a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant Soil**, v. 338, 143-158, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>
- SALVADOR, M. S. S.; BERNADO, I. E. S.; LIMA, V. R. P.; BORGES NETO, I. O. Floristic diversity in Lajedo do Bravo, Cariri paraibano. **Revista Geotemas**, v. 13, e02328, 2023. <https://doi.org/10.33237/2236-255X.2023.5137>
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 5. ed. Revista e Ampliada Embrapa, Brasília, DF, 2018.
- SCHUT, A. G. T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; KEPPEL, G.; BARAN, I.; FRANKLIN, S. E.; HOPPER, S. D.; VAN NIEL, K. P.; MUCINA, L.; BYRNE, M. Rapid Characterisation of Vegetation Structure to Predict Refugia and Climate Change Impacts across a Global Biodiversity Hotspot. **PLoS ONE**, v. 9, n. 1, e82778, p. 1-15, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082778>
- SILVA, J. M. C.; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: Understanding the Challenges. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (eds.). **The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Springer, Cham, 2017, p. 3-19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_1
- SILVEIRA, V. A.; VELOSO, G. V.; PAULA, H. B.; SANTOS, A. R. dos; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I.; FRANCELINO, M. R. Modeling and mapping of Inselberg habitats for environmental conservation in the Atlantic Forest and Caatinga domains, Brazil. **Environmental advances**, v. 8, 100209, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100209>
- SOUZA, J. J. L. L.; MEDEIROS, V. B.; OLIVEIRA, P. E.; SOUZA, B. I.; BARRETO, A. M. F.; OLIVEIRA, É. V.; PESSEDA, L. C. R. Vegetable coverage, anthropogenic action, and paleoclimates in the Caatinga. **Mercator** (Fortaleza), v. 22, p. e22011, 2023. <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22011>
- SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; CARDOSO, E. C. M.; MEDEIROS, J. R.; FONSECA, C. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **Catena**, v. 212, 106101, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106101>
- SOUZA, N. R. L.; XAVIER, R. A.; BORGES NETO, I. O. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico do Plúton Bravo no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2460>
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Revista e Ampliada Embrapa, Brasília, DF, 2017, p. 574.
- TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000-2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>
- VANSCHOENWINKEL, B.; PAULA, L. F. A.; SNOEKS, J. M.; VAN DER STOCKEN, T.; BUSCHKE, F. T.; POREMBSKI, S.; SILVEIRA, F. A. O. The ecological and evolutionary dynamics of inselbergs. **Biological Reviews**, v. 100, n. 2, p. 481-507, 2025. <https://doi.org/10.1111/brv.13150>
- ZÁDOROVÁ, T.; PENÍŽEK, V.; MIHALJEVIČ, M.; KOUBOVÁ, M.; LISÁ, L.; ETTLER, V.; TEJNECKÝ, V.; DRÁBEK, O.; PAVLŮ, L.; KRÍBEK, B.; VANĚK, A.; SRACEK, O.; ROJAS, J. R.; HRDLIČKA, T.; VOKURKOVÁ, P.; MAPANI, B. Local diversity of soil forming processes in the semi-arid tropics and its environmental drivers: An example from Otavi Mountains, northern Namibia. **Catena**, v. 249, n. 108671, p. 108671, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108671>



MODELAGEM DE PERDA DE SOLO NOS MUNICÍPIOS COSTEIROS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: RELAÇÕES ENTRE USO E COBERTURA DA TERRA E DINÂMICA EROSIVA

Silvio Braz de Sousa ¹

Marcelo Ribeiro Divino Pereira ²

Daniel Carlos Alves Santos ³

Rodrigo de Freitas Amorim ⁴

Ana Paula Rodrigues Feitosa Frazão ⁵

Heleriany de Medeiros Madeiros ⁶

PALAVRAS-CHAVE: Manejo e conservação dos solos; Rio Grande do Norte; Geotecnologias.

RESUMO

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) é amplamente utilizada para estimar o Potencial Natural Erosivo (PNE) e a erosão laminar dos solos. Esta pesquisa, estimou o PNE e a perda de solo (ton./ha/ano) nos municípios defrontantes com mar do estado do Rio Grande do Norte (MDM), uma área total de aproximadamente 644.858 hectares, região que do ponto de vista geomorfológico é composta por tabuleiros costeiros, planície fluviomarinhas e marinhas. Os procedimentos metodológicos envolvem a confecção de um mapa de uso e cobertura da terra com 16 diferentes classes, ano base 2024, dados de precipitação entre 1998 e 2018 dos satélites TRMM e GPM, dados da missão SRTM (USGS) e a aplicação da EUPS, adotando uma escala cartográfica de trabalho de 1:100.000. Os resultados, indicam baixo potencial natural erosivo em toda a área de estudo. No entanto, quando se modela a perda de solo considerando a cobertura e uso da terra atual (2024), mesmo que 88,1% (~ 568 mil hectares) da área tenha registrado perdas até 0,8 ton/ha/ano, há concentração significativa de perdas em terrenos de intensa atividade agrícola, principalmente o plantio de cana-de-açúcar. Estas áreas, estão concentradas nos municípios de Baía Formosa, Vila Flor e Canguaretama, e com manchas em Extremoz, Ceará-Mirim, Nísia Floresta e Touros, locais em que se estima perdas entre 0,9 e 4,7 ton/ha/ano, com extensão total de 70.727 hectares. Algumas áreas que conjugam uso agrícola e relevo com declividades maiores que 12%, estimam-

- ¹ Docente da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - RN, silvio.braz@ufrn.br
- ² Professor da Secretaria Municipal da Educação de Palmas (SEMED) - TO, mdrpereira10@gmail.com
- ³ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGe) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - RN, danielcarlos472@gmail.com
- ⁴ Docente da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - RN, rodrigo.freitas@ufrn.edu.br
- ⁵ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Goiás - UFG, anapaulafrazão123@gmail.com
- ⁶ Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGe) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, heleriany.medeiros@gmail.com



se perdas entre 4,8 e 30,6 ton/ha/ano, também concentradas principalmente em Baía Formosa, Canguaretama, Ceará-Mirim e Nísia Floresta. Há áreas críticas, com perdas entre 14,8 e 30,6 ton/ha/ano de 318 ha, 170 ha, e 130 ha em Baía Formosa, Canguaretama e Ceará-Mirim respectivamente. Os resultados indicam a importância da influência do uso agrícola na perda de solo na área de estudo, já que esse tipo de uso e cobertura da terra, concentra ~52% das áreas que perdem entre 4,8 e 30,6 ton/ha/ano nos MDM, bem como, o baixo potencial natural de erosão dos solos, indicando, que nestes locais se possam adotar medidas para minimizar este impacto ambiental.

INTRODUÇÃO

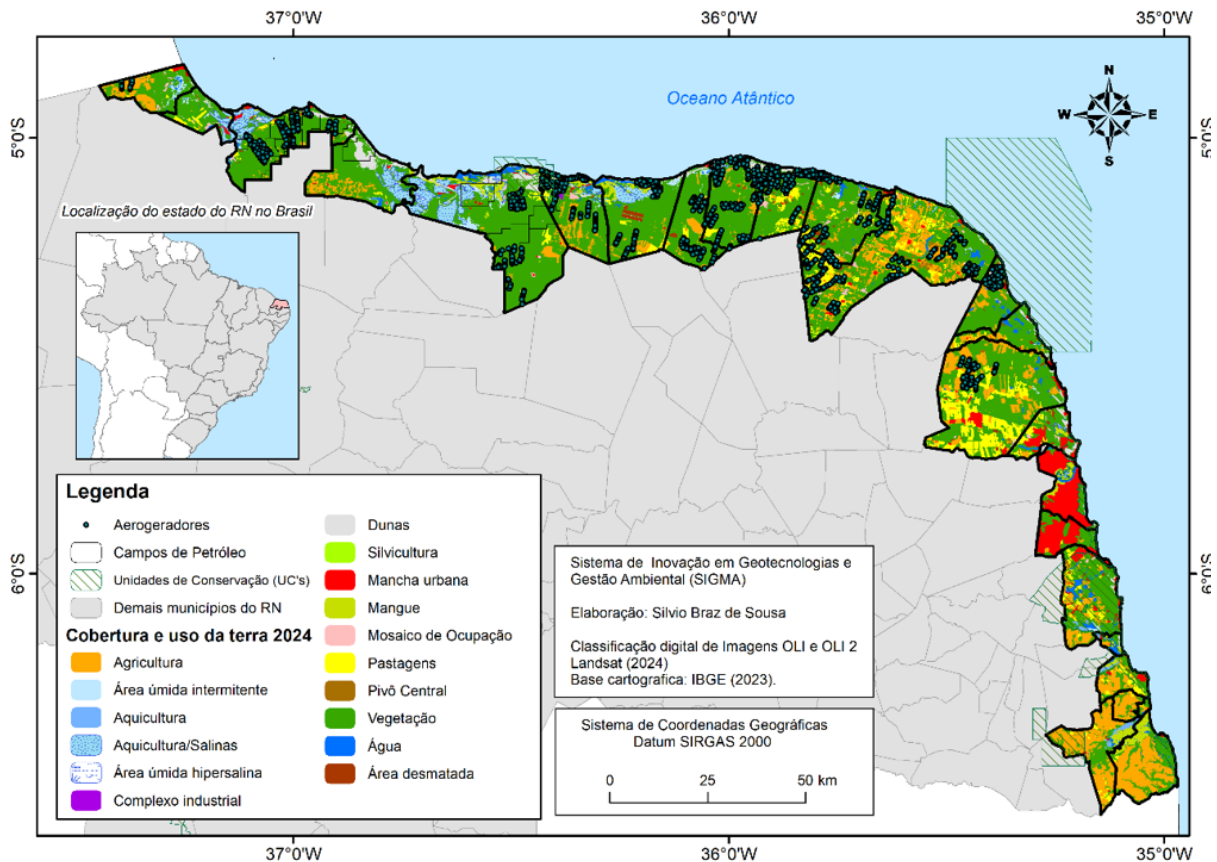
A perda de solos é um fenômeno que impacta as atividades econômicas, porém, sua intensificação é influenciada pelas atividades antrópicas, principalmente, a remoção da cobertura vegetal e substituição por coberturas artificiais, principalmente uso agrícola, tais como monoculturas, e pastagens dedicadas a pecuária bovina. A falta de cobertura vegetal intensifica a ocorrência de salpicamento, e a concentração do escoamento superficial, o que inevitavelmente conduz ao maior transporte de material particulado (Florenzano, 2008).

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), do inglês *Universal Soil Loss Equation* (USLE) é amplamente adotada para a modelagem à perda de solo considerando a influência da troca de energia e matéria entre os diferentes compartimentos da paisagem em relação ao grau de intervenção antrópica por meio de técnicas cartográficas (Wischmeier; Smith, 1978; Crepani, 2001). É importante registrar que esta equação, criada originalmente para o ambiente estadunidense, foi adaptada para o contexto brasileiro por Bertoni e Lombardi Neto (1975) e envolve a composição de extenso banco de dados para modelar a quantidade de solo perdida pela superfície considerando a declividade do relevo, o regime de precipitação e as diferentes formas de utilizar e cobrir a terra.

Nesse sentido, esta pesquisa estimou o Potencial Natural Erosivo (PNE) e a perda de solo (ton/ha/ano) nos municípios costeiros do estado do Rio Grande do Norte (RN), uma área total de aproximadamente 644.858 hectares, que abrange 24 municípios (Figura 1) e se constitui uma região que do ponto de vista geomorfológico é composta por tabuleiros costeiros, planície fluviomarinhas e marinhas, além de abrigar diversos tipos de utilização das terras, desde áreas protegidas principalmente para uso sustentável, cobertura vegetal, produção de energia por meio de campos eólicos, produção de petróleo e uso agrícola, principalmente, plantio de cana-de-açúcar e pastagens, além é claro de áreas urbanizadas, como a capital do estado Natal.



FIGURA 1: Mapa de localização dos municípios costeiros do Rio Grande do Norte e o uso e cobertura da terra (2024)

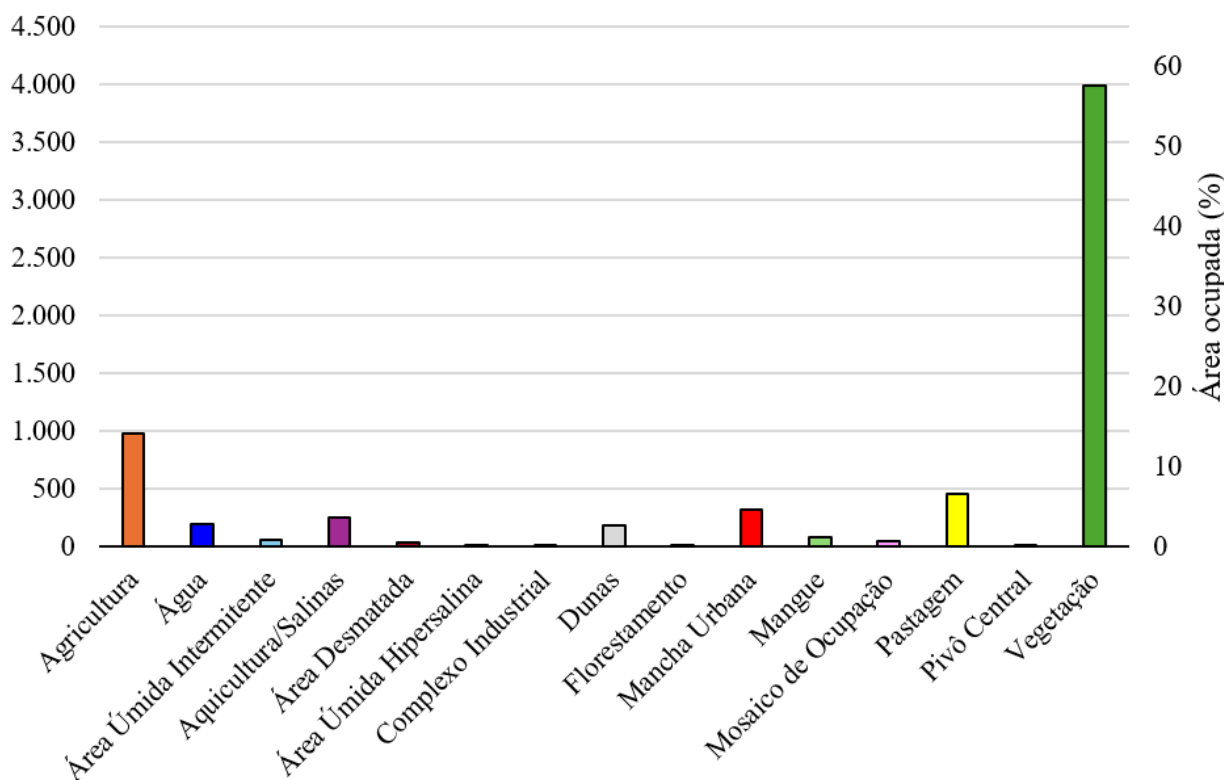


FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

A classe de uso e cobertura predominante é a de vegetação ao longo de todo o litoral, a qual ocupa 3.992 km², e representa 60% da área total dos municípios costeiros potiguares. A partir disso, segue-se as seguintes classes em termos de extensão: Agricultura (14,8%), Pastagem (6,8%), Mancha urbana (4,8%), Aquicultura/salinas (3,9%) e Água (3%), as classes dunas (2,8%), mangues (1,3%), área úmida intermitente (0,9%), mosaico de ocupação (0,7%), área desmatada (0,6%), pivô central (0,2%), área úmida hipersalina (0,02%), complexo industrial (0,02%) e florestamento (0,01%), somam juntas apenas 6,55 % do território (Figura 2).



FIGURA 2: Área ocupada e percentual relativo das classes de cobertura e uso da terra nos municípios costeiros do RN (2024)



FONTE: Elaborado pelos autores (2025)

Quanto ao uso agrícola, que geralmente guarda relação com a perda de solo em função do seu uso intenso. Do total de 14,8% de área ocupada por atividades econômicas ligadas a agricultura, 547,5 km² concentram-se predominantemente no litoral oriental, representando 55,5% do total destinado aos cultivares (987,2 km²). Destaca-se os municípios de Baía Formosa, Canguaretama e Ceará-Mirim, que juntos acumulam 380 km² de áreas cultivadas, equivalente a 38,5% da extensão cultivada nos municípios costeiros. O IBGE, registou em sua Pesquisa Produção Agrícola Municipal (PAM), ano base 2023, que Baía Formosa e Canguaretama se constituem os municípios com maiores áreas colhidas de cana-de-açúcar, com um total de 30.000 e 16.000 hectares respectivamente (IBGE, 2023).

Em relação as áreas de pastagens, Ceará-Mirim e Touros são os municípios que concentram as maiores extensões, respectivamente 166,8 km² e 102,8 km², correspondente a 36,7% e 22,6% do total de áreas de pastagem nos municípios litorâneos.

Amorim, Nonato Junior e Poster (2018), que classificaram as unidades de paisagem no RN, os municípios que compreendem a faixa litorânea oriental constituem as unidades Litoral Oriental Úmido, Tabuleiro de Cana de Açúcar e Adensamento Urbano Metropolitano (Em função da localização da Região Metropolitana de Natal – RMN); já os municípios que constituem a faixa litorânea setentrional são enquadrados dentro da classificação de



Litoral Setentrional Seco e Tabuleiro dos Ventos. A partir da caracterização que os autores propõem, observa-se no mapeamento realizado e utilizado nesta pesquisa, que as faixas litorâneas se diferenciam por suas condições geomorfológicas, climáticas e hidrológicas, consequentemente, influenciando o uso e ocupação dessas áreas e o desenvolvimento de atividade econômicas. Fato que certamente, deve influenciar na perda de solos.

METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos envolveram a adoção da EUPS (equação 1) para modelagem da perda de solo com base na literatura nacional, tais como o trabalho de Borges (2009), Pereira *et al.* (2017), Alewell *et al.* (2019), Amorim *et al.* (2010). Apesar da EUPS apresentar a menor precisão (12%) em comparação com outros modelos para estimar perda de solo, tais como *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) – 46% e *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) – 42% (Amorim *et al.*, 2010), a UEPS se configura ainda como a mais utilizada, principalmente em função da facilidade de aplicação e da necessidade de poucos dados para modelagem (Alewell *et al.*, 2019).

Equação 1

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Onde:

A = perda de solo por unidade de área e tempo ($t \times ha^{-1} \times ano^{-1}$);

R = fator de erosividade da chuva ($MJ \times mm \times ha^{-1} \times h^{-1} \times ano^{-1}$);

K = fator de erodibilidade do solo ($t \times h \times MJ^{-1} \times mm^{-1}$);

LS = fator de manejo e cobertura do solo (adimensional);

P = fator de práticas conservacionistas (adimensional).

O Potencial Natural de Erosão (PNE) dos solos por sua vez, é calculado conforme a Equação 2, e diz respeito aos fatores naturais sem considerar a influência antrópica.

Equação 2

$$PNE = R \times K \times LS$$

Onde:

PNE = Potencial Natural de Erosão ($\frac{t}{ha^{-1}} \times ano^{-1}$);

R = Fator de erosividade da chuva ($MJ \times mm \times ha^{-1} \times ano^{-1}$);

K = Fator de erodibilidade do solo ($t \times h \times MJ^{-1} \times mm^{-1}$);

LS = fator topográfico (adimensional).

Para aplicar as equações EUPS e PNE, é necessário gerar vários parâmetros em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), os quais possuem diversos dados de entrada e equações específicas.



O fator topográfico (LS), foi calculado por meio de dados *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) que possui 30 metros de resolução espacial e é disponível gratuitamente no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS - <https://earthexplorer.usgs.gov>).

Para o fator manejo do solo e de Práticas Conservacionistas (CP) foi utilizada imagens do sensor *Operational Land Imager* (OLI e OLI 2) a bordo do satélite Landsat 8 e 9 para geração do mapa de uso e cobertura da terra, com 16 diferentes classes, ano base 2024. Na literatura, existem várias pesquisas que consolidam o uso dos satélites Landsat para criação de mapas de uso e cobertura da terra em escala de semidetalhe. Ressalta-se que essa série de satélites é a de maior sucesso em monitoramento sistemático da superfície terrestre (FERREIRA *et al.*, 2008).

As imagens foram processadas na plataforma *Google Earth Engine* (GEE - <https://earthengine.google.com/>), totalmente baseado na infraestrutura em “Nuvem” do Google, e passaram por um processo de filtragem, com intuito de se retirar as interferências atmosféricas e as nuvens que podem obstruir a visibilidade da superfície terrestre, fator que influência de forma intensa no mapeamento de áreas costeiras, principalmente por existir grandes quantidades de nuvens que inviabilizam mapeamentos de uso e cobertura da terra.

Assim, um composite com os melhores pixels de imagens OLI e OLI 2 Landsat foi submetido a um processo de classificação não supervisionado, por meio do algorítmico *k-means*, assumindo oito classes, erro aceitável de 5% e 10 números de interações. A partir disso, foi realizada filtragem de pixels isolados, usando uma ferramenta do tipo *Sieve Classes*, partir da análise da vizinhança imediata do pixel analisados, admitindo um número de filtragem até 10 pixels agrupados, o que considerando a resolução de 30 metros da banda Landsat equivale a uma área máxima de 9.000 metros quadrados (9 km²), o que é compatível com a escala cartográfica de mapeamento proposta (1:100.000).

Após a aplicação da filtragem de pixels isolados, foi efetuada a aplicação de uma análise de maioria, na qual os pixels isolados identificados pela ferramenta *Sieve Classes*, foram reclassificados para a classe predominante na vizinhança, para este filtro de maioria adotou-se uma grade (*kernel*) de 21 x 21 pixels e com peso 1 para o pixel central. Por fim, foi aplicado um filtro de agregação, que agrega um agrupamento de pixels menores a um grupo maior, no qual também foi assumido um agrupamento de 10 pixels.

Após a filtragem pós classificação, deu-se início a inspeção visual e correção vetorial. Neste momento, a inspeção minuciosa, resultou na identificação e mapeamento de dezesseis classes: Agricultura; Área úmida intermitente; Aquicultura; Aquicultura/Salinas; Área úmida hipersalina; Complexo industrial; Dunas; Silvicultura; Mancha



Urbana; Mangue; Mosaico de Ocupação; Pastagens; Pivô Central; Vegetação; Água; Área desmatada. Tais classes refletem o universo da área de estudo, bem como, a capacidade de identificação de alvos dos analistas em imagens OLI e OLI 2 Landsat.

Para o cálculo do fator (R), referente a erosividade das chuvas, foram utilizados índices pluviométricos calculados a partir de estimativas derivadas dos satélites *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* e *Global Precipitation Measurement (GPM)*, tais dados foram testados para abordagem regional inclusive no Rio Grande do Norte em outros trabalhos (Sousa *et. al.*, 2019; Santos *et. al.*, 2023). Para o cálculo do fator R, Wischmeier e Smith (1978) sugerem que sejam utilizados dados pluviométricos de uma série histórica de 20 anos, nesta modelagem foram adotados dados entre 1998 e 2018, adequados para bons resultados.

As equações para cada variável podem ser conferidas em Pereira *et. al.*, (2017). Alguns dados e variáveis utilizadas no trabalho podem ser conferidos na Figura 3 juntamente com os valores referência adotados para o Fator K e o Fator CP, que foram adaptados de Wischmeier; Smith (1978); Baptista (1997); Borges (2009) e Chaves (1996; 2012) para dados de solos do Radam Brasil em escala 1:250.000. Para a classificação do PNE, foi utilizado como referência, os valores adotados por Cabral *et al.* (2005), no qual, áreas com até 100 ton. ha⁻¹.ano⁻¹, foram consideradas de baixo PNE, valores entre 100,1 e 200 ton. ha⁻¹.ano⁻¹ possuem PNE médio, e por sua vez, valores acima de 200,1 ton. ha⁻¹.ano⁻¹, foram consideradas áreas com alto PNE.

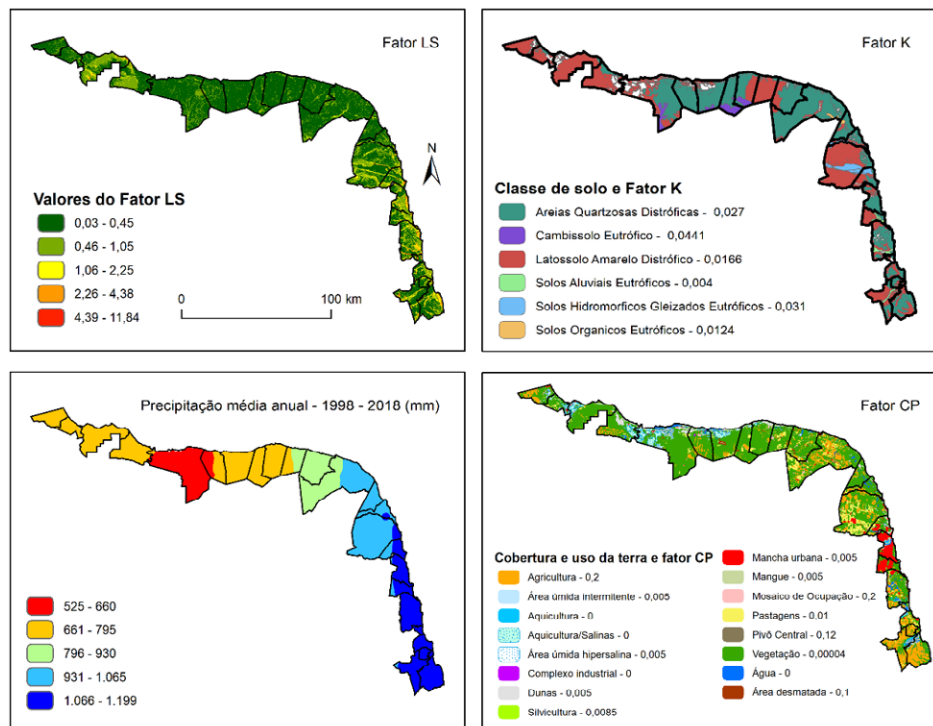


FIGURA 3 ↑ Dados de precipitação em mm (TRMM e GPM) e valores utilizados para aplicação da EUPS dos fatores erosividade (k) e de práticas conservacionistas, manejo e cobertura da terra e Práticas Conservacionistas (CP)

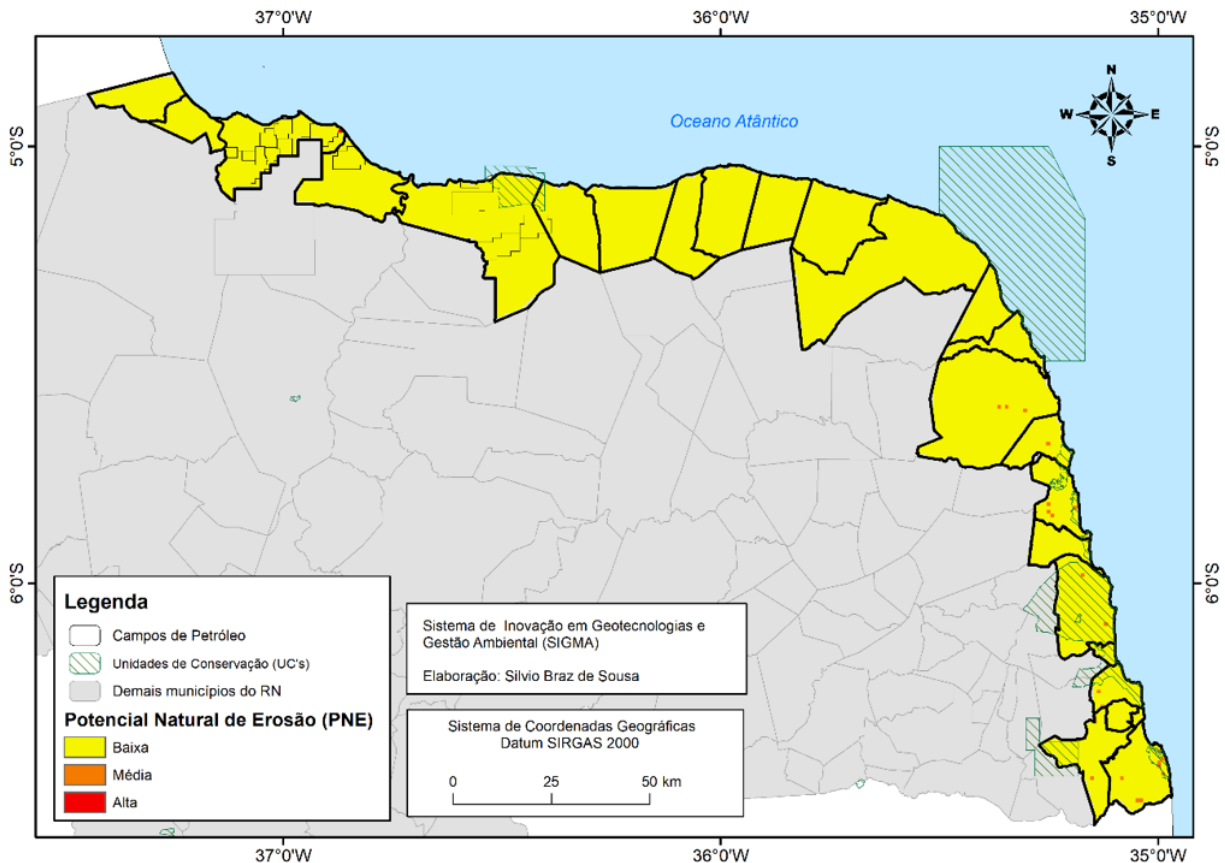
FONTE: Elaborado pelos autores (2025).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Potencial Natural Erosivo estimado em toda a área de estudo é majoritariamente baixo (Figura 4), possuindo apenas pequenos pontos isolados com potencial médio e alto. Isto indica que desconsiderando qualquer influência antrópica, no ponto de vista da erosão hídrica, a área apresenta certa estabilidade, tal resultado se mostra consistente pela influência dos tabuleiros costeiros, os quais produzem valores baixos para o fator LS.

FIGURA 4: Potencial Natural de Erosão (PNE) nos municípios costeiros do Rio Grande do Norte



FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

No entanto, quando se modela a perda de solo considerando a cobertura e uso da terra atual (2024), mesmo que 88,1% da área (~ 568 mil hectares) tenha registrado perdas até 0,8 ton./ha/ano (Tabela 1), há concentração significativa de perdas (entre 0,9 e 4,7 ton./ha/ano) em terrenos de intensa atividade agrícola, principalmente o plantio de cana-de-açúcar. Estas áreas, estão concentradas nos municípios de Baía Formosa, Vila Flor e Canguaretama, e com manchas em Extremoz, Ceará-Mirim, Nísia Floresta e Touros, locais em que se estima perdas, com extensão total de 70.727 hectares (Tabelas 1 e 2 e Figura 5).

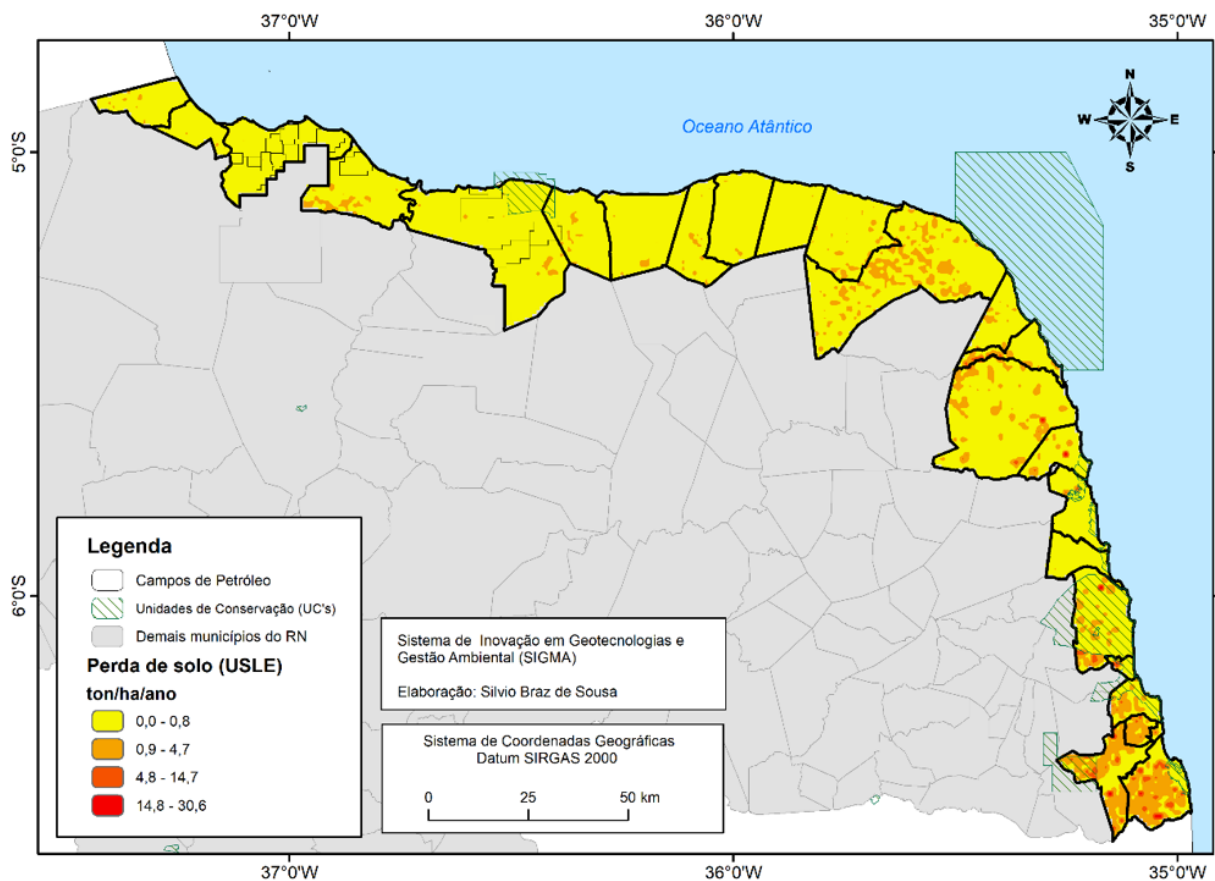


TABELA 1: Extensão do terreno (ha) e sua respectiva classe de perda de solo para a área total dos municípios costeiros do RN

Classe de perda de solo (ton./ha/ano)	Área (ha)	%
0,0 - 0,8	568.051	88,1
0,9 - 4,7	70.727	11,0
4,8 - 14,7	5.195	0,8
14,8 - 30,6	885	0,1
Total	644.858	100

FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

FIGURA 5: Perda de solos (ton./ha/ano) nos municípios costeiros do Rio Grande do Norte



FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

Em algumas áreas que conjugam uso agrícola e relevo com declividades superiores a 12%, foram estimadas perdas entre 4,8 e 30,6 ton./ha/ano (as duas classes de maiores perdas identificadas), também concentradas principalmente em Baía Formosa, Canguaretama, Ceará-Mirim e Nísia Floresta (Tabela 2). Estes municípios são os que



apresentam maior quantidade de áreas exportas a alta perda de solos, caso se considere destaque áreas com perdas superiores a 4,8 ton./ha/ano, limiar importante para monitoramento e intervenção visando a melhor conservação dos solos, afinal, esses quatro municípios juntos concentram ~ 75% dos terrenos que perdem entre 4,8 e 30,6 toneladas de solo por hectare por ano, uma área total de 4.577 ha, quando os outros 20 municípios juntos, somam apenas 1.504 hectares submetidos a essa faixa de perda.

TABELA 2: Extensão em hectares e sua respectiva classe de perda de solo (ton./ha/ano) por município

Município	Área (ha) por perda de solo (ton./ha/ano)			
	< 0,8	0,9 a 4,7	4,8 a 14,7	14,8 a 30,6
Areia Branca	33.187	298	0	0
Baía Formosa	10.572	11.324	1.343	318
Caiçara do Norte	21.210	947	0	0
Canguaretama	10.995	10.932	1.226	170
Ceará-Mirim	61.783	8.392	629	130
Extremoz	12.202	665	153	62
Galinhos	33.107	407	0	0
Grossos	11.824	274	0	0
Guamaré	24.023	1.269	0	0
Macau	73.933	1.227	0	0
Maxaranguape	10.306	1.843	496	52
Natal	15.632	124	0	0
Nísia Floresta	25.716	3.252	698	62
Rio do Fogo	13.094	1.248	0	0
Pedra Grande	21.760	62	0	0
Parnamirim	11.946	62	0	0
Porto do Mangue	27.407	2.858	0	0
Tibau	14.936	521	0	0
São Bento do Norte	28.017	211	0	0
São Miguel do Gostoso	31.245	2.844	0	0
Senador Georgino Avelino	2.010	211	69	91
Tibau do Sul	6.756	2.437	253	0
Touros	64.458	16.792	0	0
Vila Flor	1.931	2.525	327	0
Total	568.051	70.727	5.195	885

FONTE: Elaborado pelos autores (2025).



Pode-se ainda destacar que, existem áreas críticas, com perdas entre 14,8 e 30,6 ton./ha/ano, somando 318 ha, 170 ha, e 130 ha em Baía Formosa, Canguaretama e Ceará-Mirim respectivamente (Tabela 2). Ao todo, foi estimado que os 24 municípios costeiros do RN perdem em conjunto um total de 2.557,6 toneladas de solo por ano.

Portanto, percebe-se que 99% da área dos municípios costeiros apresentam baixa perda de solo, um dado em consonância com o baixo potencial natural erosivo. No entanto, entre as áreas com intensa atividade agrícola, 5.195 hectares perdem entre 4,8 e 14,7 hectares, e por sua vez, 885 hectares, em situação crítica, perdem por ano entre 14,8 e 30,6 hectares, as quais carecem de uma melhor análise e se for necessário intervenção com melhores práticas para conservação dos solos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da EUPS utilizando técnicas de geoprocessamento e os dados disponibilizados gratuitamente, permitem modelar de forma rápida áreas com perdas de solos em escala regional. Afinal, a recente disponibilização de dados em serviços de nuvem, tal como permite o GEE, e o acesso a dados de sensoriamento remoto de diversas naturezas, como o TRMM e GPM voltados para estimativa de precipitação, ou os dados SRTM com 30 metros de resolução espacial, adequados para a modelagem do relevo, minimizam a necessidade de busca e ou levantamentos de dados de campo, ou de fontes secundárias, a exemplo de dados de precipitação oriundos de redes de estações meteorológicas. Assim a metodologia é ancorada amplamente na área de geotecnologias e tratamento de dados geográficos.

Os resultados indicam a importância da influência do uso agrícola na perda de solo nos municípios costeiros potiguares, já que esse tipo de uso e cobertura da terra, concentra ~52% das áreas que perdem entre 4,8 e 30,6 ton./ha/ano. O baixo potencial natural de erosão dos solos (PNE), indica, que nestes locais se possam adotar medidas para minimizar este impacto ambiental. De forma geral, os municípios de Baía Formosa, Canguaretama, Ceará-Mirim e Nísia Floresta são destaque no que diz respeito a perda de solos, juntos representam 75% da área com maiores índices de perda de solos, com 4.577 hectares apresentando perda maior que 4,8 ton./ha/ano.

Considerando que os municípios costeiros, perdem em torno de 2.557,6 toneladas de solo por ano, os resultados desta pesquisa podem subsidiar a identificação de áreas vulneráveis à erosão, permitindo o zonamento ambiental, o desenvolvimento de ações de fiscalização e criação de planos de manejo. Além disso, permite que se possa direcionar



políticas públicas que incentivem a conservação do solo, tais como, as voltadas à extensão rural e ao fornecimento de crédito rural destinado a promoção de equilíbrio entre o uso dos recursos naturais e as atividades econômicas.

Agradecimentos:

Este trabalho insere-se no conjunto de iniciativas do Sistema de Inovações em Geotecnologias e Gestão Ambiental (SIGMA), do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DGE/UFRN), voltadas à gestão territorial e ambiental no Brasil. O primeiro autor agradece ao Ministério da Educação (MEC) pela concessão da bolsa de tutoria do Programa de Educação Tutorial (PET) – Geografia. Os demais autores agradecem também ao Ministério da Integração de Desenvolvimento Regional (MIDR) pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa no âmbito do projeto Falésias, coordenado pelo quarto autor desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALEWELL, Christine; BORRELLI, Paquale; MEUSBURGER, Katrin; PANAGOS, Panos. **Using the USLE: chances, challenges and limitations of soil erosion modelling**. ISWCR World Association of Soil and Water Conservation, v. 9, p. 203–225, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>.
- AMORIM, Ricardo S. S.; DA SILVA, Demetrius D.; PRUSKI, Fernando F.; DE MATOS, Antônio T. **Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1046–1049, nov./dez. 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000600006.
- AMORIM, Rodrigo de Freitas; NONATO JUNIOR, Raimundo; POSTER, Juliana Felipe Farias. Paisagens do Rio Grande do Norte: uma introdução às diversidades regionais e marcas das ações geográficas no espaço potiguar. **Confins**, n. 34, 2018. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/12961>. Acesso em: 25 jul. 2025. <https://doi.org/10.4000/confins.12961>.
- BORGES, Kelly Maria Resende. **Avaliação da susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhonha (MG/BA) por meio da EUPS - Equação Universal de Perda de Solos**. 2009. 68 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V. A.; SCOPEL, I.; LOPES, R. M. **Uso de técnicas de geoprocessamento para mapear o potencial natural de erosão da chuva na bacia hidrográfica do reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG**. RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise, n. 10, p. 81–95, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v10i0.4982>.
- CREPANI, Edison; MEDEIROS, José Simeão de; FILHO, Pedro Hernandez; FLORENZANO, Teresa Gallotti; DUARTE, Valdete; BARBOSA, Cláudio Clemente Faria. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.



CHAVES, H. M. L. **Modelagem matemática da erosão hídrica: passado, presente e futuro.** In: ALVAREZ, V. V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (org.). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 731-750.

CHAVES, Henrique Marinho Leite. **Projeto produtor de água, bacia do rio Taquarussu.** 2º Relatório de Consultoria – Produto D.1. TNC-SANEATINS, 2012.

FERREIRA, Laerte Guimarães; FERREIRA, Nilson Clementino.; FERREIRA, Manuel Eduardo. **Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado da arte.** Acta Scientiarum. Biological Sciences, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal – PAM 2023:** Culturas temporárias. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: Acesso em: 25 jul. 2025.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Erodibilidade de solos paulistas.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1975. 12p. (Boletim técnico, 27).

PEREIRA, Marcelo Ribeiro Divino; SANTOS, Alisson Almeida dos; SOUSA, Silvio Braz. **Aplicação da equação universal de perda de solo (USLE) na predição a erosão hídrica na bacia hidrográfica do córrego Francisquinha - Porto Nacional - TO.** Revista Tocantinense de Geografia, v. 6, p. 100-112, 2017.

SANTOS, Daniel Carlos Alves; SOUSA, Silvio Braz; ARANTES, Arielle Elias; AMORIM, Rodrigo de Freitas; COSTA, Carlos Wilmer. **Análise comparativa de qualidade de dados de estações pluviométricas automáticas e convencionais do INMET e dados do satélite GPM para o RN, Brasil (2017).** Sociedade e Território, v. 34, n. 3, p. 53–74, 2023. DOI: 10.21680/2177-8396.2022v34n3ID27489. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/27489>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SOUSA, Silvio Braz; SANTOS, Daniel Carlos Alves; ARANTES, Arielle Elias; COSTA, Carlos Wilmer. **Análise comparativa entre estações pluviométricas convencionais e dados do satélite GPM para o estado do Rio Grande do Norte (RN).** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/trabalhos/analise-comparativa-entre-estacoes-pluviometricas-convencionais-e-dados-do-satel?lang=pt-br>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

WISCHMEIER, Walter H.; SMITH, Dwight D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537).



LEVANTAMENTO DE SOLOS COMO BASE PARA PLANEJAMENTO DO USO DA TERRA NA AGROVILA RAIMUNDO NONATO – SEMIÁRIDO POTIGUAR*

*Dados preliminares da dissertação de mestrado em andamento da primeira autora, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Geografia (GEOCERES) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sob orientação do Prof. Dr. João Santiago Reis. Pesquisa financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), Programa de Pós-Graduação em Geografia (GEOCERES) e Pró-Reitoria de Extensão da UFRN (PROEX).

Ana Livia Araújo de Azevedo **1**

Renato Batista Cavalcante **2**

Fabiano Souza de Macedo **3**

Rone José dos Santos Costa **4**

Francisco das Chagas Araújo de Paiva **5**

João Santiago Reis **6**

PALAVRAS-CHAVE: Assentamento rural, Classificação de solos, Pedologia, Solos do semiárido.

RESUMO

Os Levantamentos de Solos são ferramentas indispensáveis para o planejamento do uso da terra visando a utilização eficiente dos recursos naturais. A Agrovila Raimundo Nonato, localizada em Jucurutu (RN), representa um dos núcleos de assentamentos rurais destinado às famílias atingidas pela construção da Barragem de Oiticica. Considerando a agricultura familiar como principal atividade econômica do assentamento, são necessários estudos acerca das potencialidades e limitações de seus solos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar um reconhecimento dos solos da área, caracterizando os atributos físicos, químicos e morfológicos de perfis de solos de sua área produtiva. Os perfis se apresentam, de maneira geral, eutróficos, com textura predominantemente arenosa, pH ligeiramente ácido, com argilas de alta atividade, além de soma de bases e CTC relativamente baixas considerando os padrões regionais. Os solos foram classificados como Luvissole Háplico Órtico vertissólico (P1); Neossolo Litólico Eutrófico típico (P2, P7); Neossolo Flúvico Psamítico êutrico (P3); Neossolo Regolítico Eutrófico leptofragmentário (P4); Neossolo Litólico Distrófico fragmentário (P5, P10); Neossolo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico (P6); Neossolo Litólico Distrófico típico (P8) e Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário (P9). Foi

- 1** Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia (GEOCERES) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, analivia.ob@hotmail.com
- 2** Graduando de Bacharelado em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, renatocavalcantetreze@hotmail.com
- 3** Graduando de Licenciatura em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, fabiano.souza.103@ufrn.edu.br
- 4** Graduando de Licenciatura em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, rone.jose.costa.018@ufrn.edu.br
- 5** Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRS, franciscochagas621@gmail.com
- 6** Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia (CERES) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, joao.reis@ufrn.com



diagnosticada predominância de Neossolos Litólicos, que ocorrem em diversas posições topográficas desde topo até sopé de algumas encostas, geralmente associados a afloramentos rochosos. P1 apresentou características distintas, como presença de horizonte B textural e elevados teores de SB em profundidade. P3 e P6, localizados em várzeas, apresentam similaridades como sequência de horizontes C de granulometria heterogênea e caráter êutrico. Em síntese, observa-se relativa pedodiversidade na área e características que indicam limitações de uso como pouca profundidade efetiva, considerável pedregosidade e baixos teores de argila. Os resultados evidenciam a necessidade do conhecimento dos solos para delimitações de abordagens específicas de manejo, contribuindo para a garantia da produtividade a longo prazo e inserção das famílias reassentadas na dinâmica econômica regional.

INTRODUÇÃO

O Sertão nordestino possui um contexto histórico marcado pela seca, fenômeno que, ao longo dos séculos, construiu uma imagem social da região como um “espaço-problema”, de escassez, fome e miséria (Silva, 2003). Como resposta, o Estado desenvolveu políticas públicas voltadas à mitigação dos efeitos da seca, priorizando grandes obras hídricas, como açudes, barragens e projetos de irrigação.

Atualmente, destaca-se o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), que visa garantir o abastecimento hídrico a diversos municípios do Nordeste (Castro e Cerezini, 2022). No Seridó Potiguar, a Barragem de Oiticica, ligada ao PISF, cumpre papel estratégico, sendo fundamental para a segurança hídrica regional e para fomentar atividades produtivas, especialmente a agricultura irrigada, seguindo modelos já implantados na região, como o da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Brasil, 2011).

Apesar dos benefícios, essas obras também acarretam impactos sociais durante sua implementação, como o deslocamento de famílias inseridas nas áreas destinadas ao alagamento. Esse é o caso da Agrovila Raimundo Nonato, no município de Jucurutu (RN), onde cerca de 37 famílias de trabalhadores rurais sem-terra foram assentadas após a construção da Barragem de Oiticica. Nessa nova configuração territorial, a agricultura familiar surge como a principal atividade econômica, exigindo estudos que avaliem o potencial dos solos locais para garantir a viabilidade produtiva e a segurança alimentar das famílias.

Além disso, tais estudos contribuem para o fortalecimento do vínculo social, cultural e produtivo dos assentados com a terra, visto que, “(...) morar é muito singular, é mais do que habitar. Diz respeito a um modo de viver, à convivência com o espaço, com a natureza.” (Martins, 2009, *apud* Silva e Vasconcelos, 2018).

No Semiárido Potiguar, onde predominam condições climáticas adversas e solos geralmente rasos e de baixo potencial produtivo (Dias, 2018), o levantamento pedológico



se torna uma ferramenta essencial, não apenas para reconhecer os solos e identificar limitações, mas para revelar oportunidades ocultas no próprio território, orientando práticas de manejo adequadas, auxiliando a transformar possíveis limitações e áreas com necessidades específicas de manejo em sistemas produtivos adaptados, onde conservação e produtividade coexistem (Silva, 2010).

Neste contexto, o presente estudo objetivou realizar um levantamento dos solos presentes na área produtiva da Agrovila Raimundo Nonato (Jucurutu – RN), para reconhecimento das características pedológicas locais, assim como para subsidiar futuras interpretações de aptidão, potencialidades e limitações de uso e manejo.

MATERIAIS E MÉTODOS

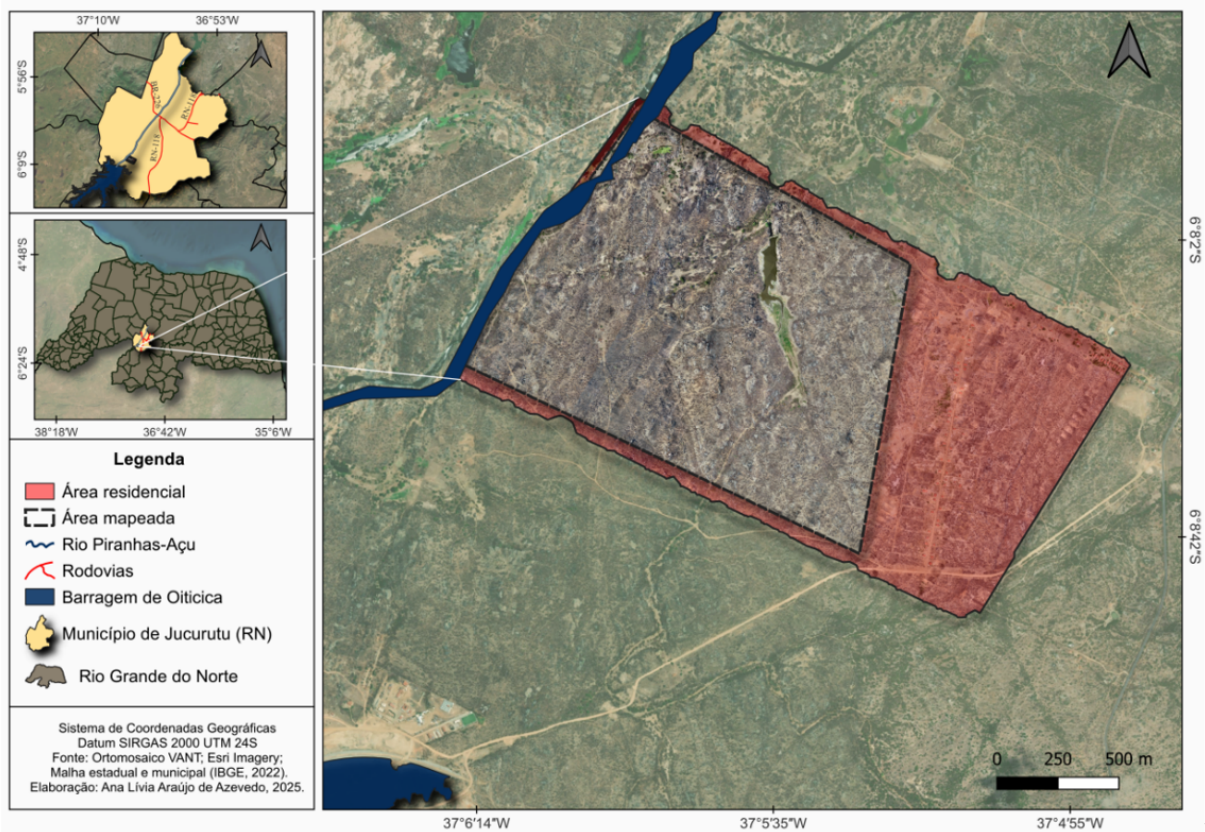
A área de estudo localiza-se na Agrovila Raimundo Nonato, no município de Jucurutu (RN). Criada com o objetivo de atender as demandas dos trabalhadores rurais que viviam em áreas afetadas pela inundação da Barragem de Oiticica, o assentamento integra cerca de 37 famílias de agricultores, cujas principais atividades econômicas são a agricultura familiar e a pecuária. A área total da Agrovila corresponde a cerca 275 hectares, mas a área em que foi realizado o levantamento corresponde à extensão utilizada pelos assentados para atividades agropecuárias, compreendendo aproximadamente 189 hectares (Figura 1).

A região tem clima classificado como Semiárido quente (BSh), conforme classificação climática proposta por Köppen (Alvares et al., 2013), apresentando precipitações sazonais, com média de 861 mm/ano e temperatura média de 28,1°C. A vegetação caracteriza-se como Caatinga hiperxerófila aberta de porte arbóreo-arbustivo, condicionada pelo contexto de déficit hídrico regional (CPRM, 2005).

Geomorfologicamente, a região se insere na Superfície Rebaixada Sertaneja, apresentando significativa presença de afloramentos rochosos e fragmentos de rocha, típicos do contexto geomorfológico da área. Associada à Formação Jucurutu, unidade basal do Grupo Seridó, a litologia é composta predominantemente por biotita-anfibólios gnaisses granuloblásticos e sedimentos arenos-argilosos associados à planície aluvionar do Rio Piranhas-Açu, que está em contato direto com a área de estudo.



FIGURA 1: Mapa de localização da Agrovila Raimundo Nonato, Jucurutu (RN).



FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

Para o levantamento de solos da área de estudo foram descritos e coletados 10 perfis de solos, de acordo com Santos et al. (2015), com localização orientada através de percorrimento extensivo do local, onde foram identificando pontos representativos da paisagem considerando padrões e características distribuídas espacialmente na área (Figura 2).

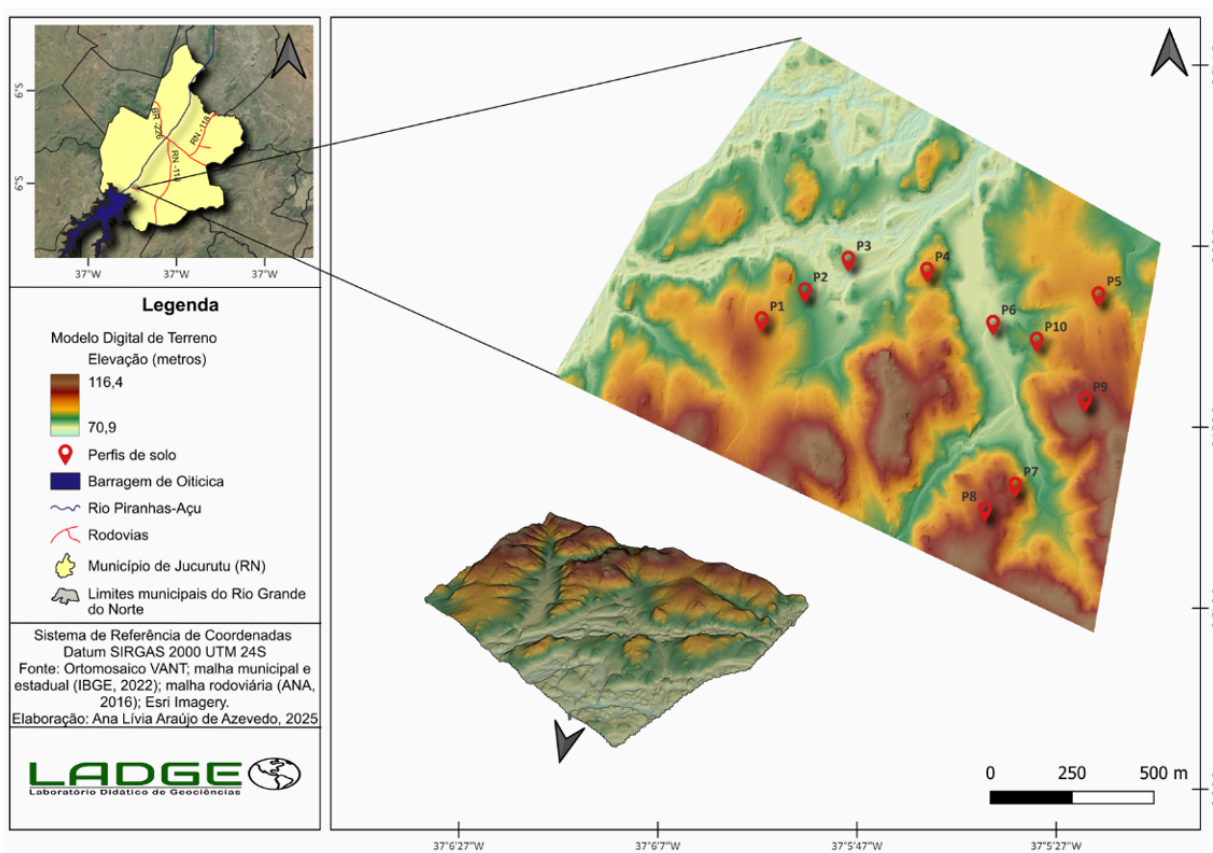
As amostras de solo coletadas foram secas à sombra, destorroadas e submetidas a peneiramento em malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e realização das análises no Laboratório Didático de Geociências (LADGEO/UFRN). Todos os procedimentos laboratoriais seguiram as normas estabelecidas pelo Manual de Métodos de Análise de Solos (Teixeira et al., 2017).

A análise granulométrica quantificou os teores das frações areia fina, areia grossa, silte e argila. Para isso, as amostras foram dispersas com solução de hexametáfosfato de sódio ((NaPO_3)₆) e carbonato de sódio (Na_2CO_3) como tampão, seguida de agitação lenta por 16 horas. As propriedades químicas das amostras de solo foram avaliadas conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). O pH foi quantificado em água e em solução de KCl 1 mol L⁻¹; A acidez trocável (Al^{3+}) foi determinada através da extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹ seguida de titulação com NaOH 0,05 mol L⁻¹. Os teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram obtidos mediante extração com KCl 1 mol L⁻¹



e quantificação por compleximetria, enquanto os teores de potássio (K^+) e sódio (Na^+) foram extraídos utilizando solução ácida Mehlich⁻¹ (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) e posteriormente dosados em fotômetro de chama. A acidez potencial foi avaliada através do método do acetato de cálcio em pH 7, completando assim a caracterização química das amostras. A partir destes resultados, foram calculados a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) potencial (T), saturação por bases (V), porcentagem de sódio trocável (PST), e saturação por alumínio (m).

FIGURA 2: Localização dos pontos dos perfis de solo e representação topográfica do assentamento.



FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

De posse de todos os dados, os solos foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2025), a partir dos horizontes e atributos diagnósticos identificados.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O contexto da amostragem dos perfis de solos da área de estudo é apresentado na Tabela 1. De modo geral, a maioria das trincheiras localizam-se em topo de morro, principalmente em áreas de relevo plano ou suave ondulado. Com material de origem composto em sua maioria por produtos da alteração de gnaisses, os perfis (Quadro 1) demonstram coloração marrom-amarelo escuras e marrom escura (matiz 7.5 YR até 10YR), estrutura predominante em grãos simples e blocos subangulares com fraco grau de desenvolvimento.

O perfil 1 (P1) tem como material de origem gnaisses alterados, localiza-se em topo de morro, apresentando moderada pedregosidade, boa drenagem e uso atual para pecuária extensiva. Apresenta sequência de horizontes Ap-A2-Bt-Cr, com variação de cores entre marrom escuro (10YR 3/3) e marrom-amarelado escuro (10YR 3/4). A estrutura dos horizontes varia de granular a blocos angulares, com variações significativas na consistência e plasticidade em profundidade. Em seu horizonte Bt são observados slickensides em quantidade abundante e grau moderado.

O P2 tem como material de origem gnaisses, localiza-se em terço médio da mesma encosta de P1, sendo muito pedregoso, raso e rochoso. Possui apenas o horizonte A em contato com a rocha (R), com coloração marrom-amarelada escura (10YR 3/4), estrutura fraca em blocos subangulares e consistência dura e muito friável, apesar de ser ligeiramente pegajoso e não plástico. Apresenta contato lítico com transição abrupta e irregular para a rocha.

O P3 foi formado a partir de sedimentos aluviais depositados pelo rio Piranhas-Açu, com profundidade superior a 100 cm, sem pedregosidade superficial, e tem como característica ser excessivamente drenado. Apresenta os horizontes Ap-2C-3C-4C-5C, com colorações variando entre marrom-amarelo escuro (10YR 3/4) e marrom escuro (10YR 3/3). A principal diferença entre os horizontes está na irregularidade da granulometria (areia grossa/areia fina/silte), característica que evidencia o caráter flúvico do perfil. No horizonte 5C, a partir de 100 cm, predominam seixos rolados sobre a fração terra fina (≤ 2 mm).



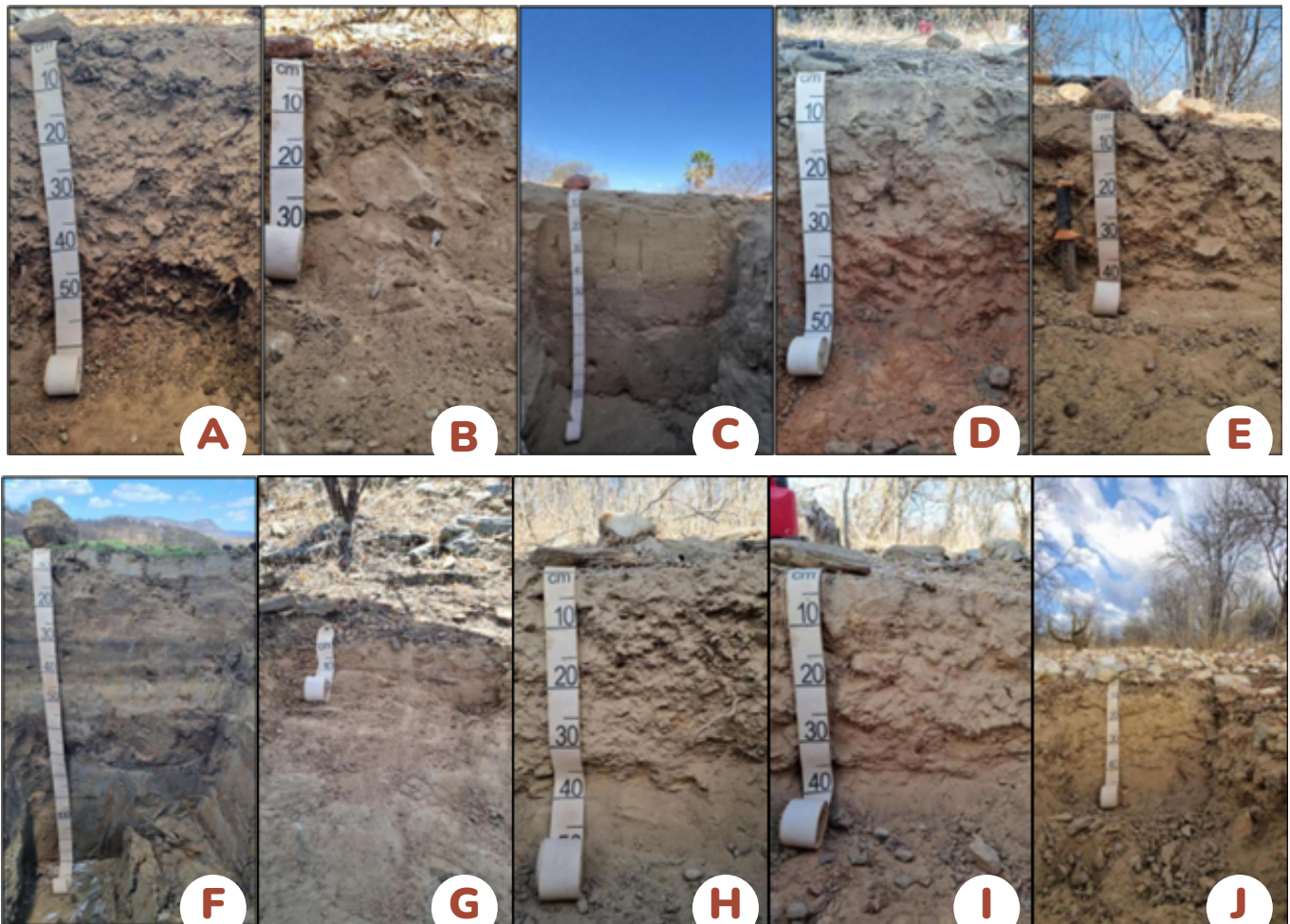
TABELA 1: Descrição da situação e classificação dos perfis de solo.

Perfil	Classificação	Altitude	Situação
P1	Luvissoilo Háptico Órtico vertissólico	96 m	Trincheira em terço superior/topo sob relevo suave ondulado
P2	Neossoilo Litólico Eutrófico típico	81 m	Trincheira em terço inferior sob relevo suave ondulado
P3	Neossoilo Flúvico Psamítico êutrico	79 m	Trincheira em leito maior no Rio Piranhas-Açu sob relevo plano
P4	Neossoilo Regolítico Eutrófico leptofragmentário	91 m	Trincheira em topo morro sob relevo plano
P5	Neossoilo Litólico Distrófico fragmentário	93 m	Trincheira aberta em topo morro sob relevo plano
P6	Neossoilo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico	78 m	Trincheira em área de barramento inundável, em fundo de vale, sob relevo plano
P7	Neossoilo Litólico Eutrófico típico	97 m	Trincheira aberta em terço superior da encosta sob relevo ondulado
P8	Neossoilo Litólico Distrófico típico	103 m	Trincheira aberta em ombro da encosta sob relevo plano
P9	Neossoilo Litólico Eutrófico fragmentário	105 m	Trincheira aberta em topo de morro plano sob relevo plano
P10	Neossoilo Litólico Distrófico fragmentário	87 m	Trincheira aberta em terço médio de encosta sob relevo suave ondulado

O P4 e o P5 originam-se a partir de gnaisses e situam-se em áreas de pousio. O P4 é pedregoso, moderadamente rochoso e bem drenado, com horizontes A1-A2-Cr, apresentando variação de cores entre marrom muito escuro (10YR 2/2) e vermelho (2.5YR 3/6) no A2. O P5 é extremamente pedregoso e ligeiramente rochoso, com presença de calhaus de quartzo. Possui horizontes A-Cr, ambos com coloração marrom-amarelo escura (10YR 3/3). Ambos os perfis apresentam estruturas fracas em blocos subangulares e consistência variando entre dura (seca) e muito friável (úmida).



FIGURA 3: Perfis de solo representativos da área de estudo.



A - P1 (Luvissole Háplico Órtico vertissólico); B - P2 (Neossole Litólico Eutrófico típico); C - P3 (Neossole Flúvico Psamítico êutrico); D - P4 (Neossole Regolítico Eutrófico leptofragmentário); E - P5 (Neossole Litólico Distrófico fragmentário); F - P6 (Neossole Flúvico Ta Eutrófico gleissólico); G - P7 (Neossole Litólico Eutrófico típico); H - P8 (Neossole Litólico Distrófico típico); I - P9 (Neossole Litólico Eutrófico fragmentário); J - P10 (Neossole Litólico Distrófico fragmentário).

O P6 apresenta formação derivada de sedimentos quaternários fluvio-lacustres e localiza-se em área de barramento inundável, com presença de lençol freático aflorado a 100 cm e ocorrência de microrrelevo gilgai no seu entorno. Apresenta horizonte glei evidenciado pela coloração cinza escura (7.5YR 4/1) nos horizontes Ap, 2Cg e 4Cg, e amarelo-amarronzado (10YR 5/2) em 3Cg e 5C. Foi identificado caráter flúvico pela distribuição irregular de sua granulometria. Os horizontes variam entre estrutura fraca e blocos subangulares e ausência de estrutura (grãos simples e maciça), com mosqueados que aumentam em quantidade e intensidade com a profundidade, destacando a presença de caráter redóxico no horizonte 5C.

No caso dos solos hidromórficos, como o P6, a oscilação do lençol freático pode comprometer o desenvolvimento do sistema radicular, conforme Resende et al. (2019). Durante os períodos de seca, o rebaixamento do lençol freático pode provocar estresse



hídrico, uma vez que as raízes, limitadas aos horizontes mais próximos à superfície, não conseguem alcançar a água presente em profundidade. Essa observação corrobora com a morfologia encontrada no perfil, onde as raízes se manifestaram muito finas e abundantes nos perfis A, 2Cg e 3Cg, demonstrando um maior desenvolvimento do sistema radicular na parte superior do P6. Em contrapartida, nos horizontes 4Cg e 5Cg, as raízes aparecem em menor quantidade.

O P7 e o P8 são extremamente pedregosos e rochosos, com fração grosseira composta por gnaisse (P7) e quartzo (P8), ambos bem drenados. Apresentam coloração marrom (10YR 4/3) e marrom-acinzentado (7.5YR 4/2), respectivamente. A sequência de horizontes identificada é de A sobre R (P7) e A-Cr-R (P8). O horizonte A de ambos possui estrutura moderada em blocos subangulares, consistência ligeiramente dura e muito friável, não plástico e pouco pegajoso. O Cr no P8 é solto, com estrutura de grãos simples, não plástico e não pegajoso.

O perfil 9 apresenta alta pedregosidade, moderada rochosidade e boa drenagem, com horizontes A-Cr1-Cr2, de coloração marrom-amarelada (10YR 4/4 e 10YR 5/6) e estrutura pouco desenvolvida. A consistência varia de firme a solta entre os horizontes, sendo todos não plásticos e não pegajosos. Por fim, o P10 apresenta características de extrema pedregosidade e rochosidade, com material grosseiro dominado por quartzo, possuindo os horizontes A-Cr1-Cr2 de coloração marrom-amarelada (10YR 3/4 e 10YR 3/6). Apresenta estrutura em blocos subangulares e grãos simples, com consistência de firme a muito friável, além de ser não plástico e não pegajoso.

Os resultados das análises físicas são apresentados na Tabela 2. De maneira geral, os horizontes dos perfis apresentam variação de classe textural de areia a muito argilosa, com predominância de textura arenosa. Essa característica está associada aos materiais de origem gnáissico e sedimentar recente, indicando a presença de minerais residuais mais resistentes ao intemperismo (Alho et al., 2007).

O Perfil 1 (P1) exibe características físicas distintas entre seus horizontes. Os horizontes superficiais Ap-A2 são classificados com textura areia franca, seguidos por um horizonte B textural (Bt) muito argiloso, com cerca de 615,71 g kg⁻¹ de argila. A transição abrupta observada entre os horizontes A e Bt evidencia os processos de translocação da argila (eluviação) para camadas mais profundas, acumulando-se em profundidade ou, inclusive, pela perda seletiva superficial da fração argila (elutriação), que também pode explicar o acúmulo dos minerais de argila no horizonte Bt. Além disso, no horizonte Bt também é observada a presença de slickensides, que, associadas à textura muito argilosa e à espessura mínima de 20 cm, permitem caracterizá-lo também como um horizonte vértico.



O Neossolo Litólico representado pelo Perfil 2 (P2) apresenta textura classificada como areia franca, semelhante aos resultados observados por Medeiros et al. (2013) no Seridó Potiguar. No Perfil 3 (P3), predomina a textura arenosa, com baixos teores de silte e argila. A areia fina é a fração dominante em todo o perfil, especialmente no horizonte Ap ($672,2 \text{ g kg}^{-1}$). O P4 e o P5 apresentam alto teor de areia, e a predominância dessa fração é típica dos Neossolos Regolíticos, especialmente no Nordeste, devido à influência do embasamento geológico rico em quartzo e aos processos pedogenéticos incipientes destes solos (Oliveira, 2008; *apud* Santos, 2011, 2012).

O Perfil 6 (P6) demonstra variação textural entre seus horizontes, reflexo da composição sedimentológica de diversos ciclos de sedimentação, conforme observado em solos semelhantes no estado do Rio Grande do Norte (Jacomine et al., 1971). O horizonte Ap tem textura franca, com teor de argila de $252,3 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto os subsuperficiais destacam-se pelo alto teor de areia, como o horizonte 3Cg, com cerca de $893,3 \text{ g kg}^{-1}$.

O Perfil 7 (P7), assim como o P2, apresenta textura com dominância da fração areia, exibindo classe textural areia franca. O P8 e o P9 possuem textura areia e areia franca, respectivamente, com fração grosseira dominada por quartzo e fragmentos de gnaise, o que justifica o maior teor de areia nesses solos e dá indícios de sua composição. O Perfil 10 (P10) apresenta alto teor de areia, sendo classificado com classe textural homônima. A predominância dessa fração é igualmente característica dos Neossolos Regolíticos e dos Neossolos Litólicos, especialmente no Nordeste semiárido. Sua fração grosseira é composta majoritariamente por fragmentos de quartzo, e, além disso, no local de estudo destacam-se alguns locais com presença de “ilhas” de solos muito pedregosos com calhaus de quartzo leitoso na superfície, ocorrendo de forma pontual em algumas áreas da Agrovila.



TABELA 2: Análise granulométrica dos perfis de solo.

Horizonte	Profundidade cm	Composição granulométrica da terra fina					Classe textural
		Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	
Perfil 1 - Luvissole Háplico Órtico vertissólico							
Ap	0-10	178,1	619,0	797,1	164,3	38,6	areia franca
A2	10-35	138,6	675,3	813,8	148,5	37,6	areia franca
Bt	35-65	39,3	210,9	250,3	134,0	615,7	muito argilosa
Perfil 2 - Neossolo Litólico Eutrófico típico							
A	0-6	153,9	672,2	826,0	140,0	33,9	areia franca
Perfil 3 - Neossolo Flúvico Psamítico êutrico							
Ap	0-40	133,1	814,2	947,3	43,0	9,8	areia
2C	40-60	183,2	748,9	938,8	59,0	2,2	areia
3C	60-70	458,3	525,1	969,3	21,0	9,7	areia
4C	70-100	256,2	704,1	960,9	29,1	9,9	areia
Perfil 4 - Neossolo Regolítico Eutrófico leptofragmentário							
A1	0-10	90,0	758,2	848,1	48,2	103,6	francoarenosa
A2	10-30	88,6	740,3	828,9	60,8	110,3	francoarenosa
Perfil 5 - Neossolo Litólico Distrófico fragmentário							
Ap	0-15	103,8	734,9	838,7	63,8	97,4	francoarenosa
Perfil 6 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico							
Ap	0-20	22,2	424,8	446,9	300,8	252,3	franca
2Cg	20-40	10,8	717,8	728,5	233,6	37,8	francoarenosa
3Cg	40-55	46,7	846,6	893,3	97,6	9,1	areia
4Cg	55-75	24,8	833,5	858,3	131,8	9,9	areia
Perfil 7 - Neossolo Litólico Eutrófico típico							
A	0-8	118,2	690,1	808,3	141,6	50,1	areia franca
Perfil 8 - Neossolo Litólico Distrófico típico							
A	0-25	89,6	787,9	877,5	112,7	9,8	areia
Perfil 9 - Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário							
A	0-15	82,6	760,9	843,6	146,6	9,8	areia franca
Perfil 10 - Neossolo Litólico Distrófico fragmentário							
A	0-15	143,3	711,2	854,5	135,5	10,0	areia

Observa-se um maior teor de areia fina nos perfis P8, P9 e P10, em relação aos demais solos presentes nas encostas desenvolvidas sob gnaisse. Segundo Ribeiro et. al (2009), apesar da dinâmica do relevo ser importante para a erodibilidade, os



atributos do solo são decisivos no que diz respeito à susceptibilidade do solo à erosão. Características como textura, grau de flocculação, teor de matéria orgânica, mineralogia e química são algumas das propriedades responsáveis por interferir diretamente neste processo. Nesse sentido, a textura se destaca como fator importante, condicionando processos de desagregação e transporte. Partículas como a areia fina podem apresentar baixa resistência ao desprendimento, devido à pouca coesão e, no entanto, por ser uma partícula menor em relação a areia grossa, pode ser mais facilmente transportada.

Os dados químicos dos perfis (Tabela 3) revelam uma variação de pH entre 4,9 e 7,1 que compreendem desde solos fortemente ácidos até levemente alcalinos, conforme classificação de Ribeiro (1999). Atributos como soma de bases e CTC apresentam-se baixos na maioria dos perfis, com exceção dos perfis P1 e P6 que se destacam pelos valores mais elevados nos horizontes com maiores teores de argila. Observou-se predominância de solos eutróficos, demonstrados pelos valores de saturação por bases ($> 50\%$). No entanto, os perfis P5, P8 e P10 são exceções, caracterizando solos distróficos – característica pouco comum na região. Todos os perfis apresentam valores muito baixos de Porcentagem de Sódio Trocável (PST), descartando a presença de caráter sódico ou caráter solodico nos solos estudados.

No P1, cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) são os principais responsáveis pela soma de bases (SB) e CTC. Seus teores são mais baixos no horizonte A2 devido à migração de argila e maior quantidade de areia fina.

Na Formação Jucurutu, os minerais são constituídos principalmente por uma associação de paragnaises com biotita \pm epidoto \pm anfibólio (Angelim, 2007). O intemperismo da biotita é reconhecido como um processo formador de argilas 2:1, como vermiculita e esmectita, o que aumenta diretamente a capacidade de retenção de cátions, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , no solo (Cheng et al., 2022), devido à elevada área superficial específica dessas argilas, que favorece a adsorção desses elementos (Brady & Weil, 2013). Isso explica os maiores teores de soma de bases, dentre todos os horizontes dos solos, no horizonte Bt de P1, que é o horizonte com maior teor de argila nos solos estudados.

Os perfis P2 e P9 exibem pH ácido (5,5 e 5,4, respectivamente) e a acidez potencial (H+Al) apresenta-se elevada no complexo sortivo, com $3,14 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no P2 e $2,06 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no P9, seguido de Ca^{2+} e Mg^{2+} como cátions dominantes. A CTC é média no P2 ($7,83 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e baixa no P9 ($4,62 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), refletindo diferenças no complexo de troca. Ambos são eutróficos, mas o P9 apresenta menores teores de nutrientes, possivelmente devido à maior acidez, pH mais baixo e menor teor de argila, que reduz a retenção dos nutrientes. Essas variações destacam o impacto das propriedades físico-químicas na disponibilidade de cátions nos solos (Prezotti; Guarçoni M., 2010).



TABELA 3: Atributos químicos dos perfis de solo.

Horiz.	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	K ⁺	Na ⁺	SB	T	V	m	PST
cmolc kg ⁻¹											%	
Perfil 1 - Luvissole Háplico Órtico vertissólico												
Ap	6,8	9,37	6,94	0	1,65	0,9	0,41	17,62	19,27	91,44	0	2,12
A2	6,8	3,95	3,95	0	0,83	0,43	0,26	8,56	9,39	91,16	0	2,78
Bt	7,1	18,27	21,25	0	0	0,34	1,26	41,11	41,11	100	0	3,06
Perfil 2 - Neossolo Litólico Eutrófico típico												
A	5,5	2,75	1,55	0,05	3,14	0,25	0,13	4,69	7,83	59,88	0,64	1,72
Perfil 3 - Neossolo Flúvico Psamítico éutrico												
Ap	5,8	1,58	1,52	0	1,65	0,19	0,11	3,4	5,05	67,33	0	2,24
2C	5,9	3,26	2,9	0	1,16	0,09	0,1	6,35	7,51	84,56	0	1,39
3C	5,9	1,61	1,5	0	0,83	0,04	0,05	3,2	4,03	79,41	0	1,3
4C	5,9	2,65	2,45	0	1,24	0,05	0,07	5,23	6,47	80,82	0	1,14
Perfil 4 - Neossolo Regolítico Eutrófico leptofragmentário												
A1	6	3,99	1,47	0	1,65	0,31	0,21	5,98	7,63	78,37	0	2,74
A2	5,9	1,65	0,9	0	1,32	0,16	0,1	2,82	4,14	68,08	0	2,52
Perfil 5 - Neossolo Litólico Distrófico fragmentário												
Ap	5	1,64	0,85	0,1	4,04	0,24	0,17	2,89	6,93	41,73	1,44	2,38
Perfil 6 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico												
Ap	6,3	8,87	4,44	0	2,97	0,14	0,75	14,2	17,17	82,7	0	4,38
2Cg	6,1	4,76	3,75	0	2,81	0,04	0,24	8,79	11,6	75,26	0	2,06
3Cg	6,1	1,5	1,27	0	0,99	0,03	0,06	2,86	3,85	74,26	0	1,58
4Cg	6,3	3,35	2,55	0	1,4	0,04	0,16	6,1	7,5	81,32	0	2,06
Perfil 7 - Neossolo Litólico Eutrófico típico												
A	5,5	3,55	3,12	0,05	2,06	0,12	0,1	6,9	8,96	77	0,56	1,17
Perfil 8 - Neossolo Litólico Distrófico típico												
A	4,9	0,89	0,59	0,1	2,48	0,14	0,07	1,69	4,17	40,6	2,4	1,77
Perfil 9 - Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário												
A	5,4	1,56	0,76	0,05	2,06	0,15	0,8	2,56	4,62	55,38	1,08	1,79
Perfil 10 - Neossolo Litólico Distrófico fragmentário												
A	4,9	1,04	0,14	0,1	2,89	0,16	0,08	1,42	4,31	33,01	2,32	1,92

Horiz. - horizonte; Ca²⁺ - cálcio disponível; Mg²⁺ - magnésio disponível; Al³⁺ - acidez trocável; H + Al - acidez potencial; K⁺ - potássio disponível; Na⁺ - sódio disponível; SB - soma de bases; T - capacidade de troca catiônica potencial; V - saturação por bases; m - saturação por alumínio; PST - porcentagem de sódio trocável.

O perfil P3 apresenta acidez média, com acidez potencial predominante no horizonte Ap (1,65 cmol_c kg⁻¹), seguida pelos íons de Ca²⁺ (1,56 cmol_c kg⁻¹) e Mg²⁺ (1,52 cmol_c kg⁻¹). A SB e CTC são baixas no Ap, mas aumentam nos horizontes 2C e 4C, onde Ca²⁺ e Mg²⁺ predominam. Observa-se boa fertilidade química natural indicada pelos valores de saturação por bases superiores a 50%, indicando que se trata de um solo eutrófico.



A variabilidade química pode estar associada à descontinuidade granulométrica entre horizontes. Os resultados divergem de Jacomine et al. (1971) para Neossolos Flúvicos no RN, exceto para os valores de pH.

Os perfis P4 e P10 apresentam contrastes químicos significativos. O P4 mostra pH de acidez fraca (Ribeiro, 1999), com predominância de Ca^{2+} e caráter eutrófico, enquanto o P10 tem pH classificado como acidez elevada, dominado por H+Al e caráter distrófico. A soma de bases e a CTC são mais elevadas no P4 que no P10, e provavelmente apresentam este contraste atribuído à variação na fração argila entre os perfis.

Os P5 e P8 apresentam composição química similar, com pH ácido (5,0 e 4,9, respectivamente) caracterizando acidez elevada (Ribeiro, 1999). Em ambos, a acidez potencial (H+Al) domina o complexo sortivo ($4,04 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para P5 e $2,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no P8), seguida pelo Ca^{2+} ($1,64 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no perfil 5 e $0,89 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em P8). A SB e CTC variam de média a baixa (Prezotti; Guarçoni M., 2013). Os perfis apresentam caráter distrófico, com valores de saturação por bases inferiores a 50%, fato incomum para os solos regionais (Jacomine et al., 1971).

O P6 apresenta pH entre 6,1 e 6,3, caracterizado como acidez média, segundo Ribeiro et al. (1999). Foi observada a predominância dos íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo sortivo, enquanto os valores de soma de bases e CTC variaram significativamente, com teores mais elevados observados no horizonte Ap, que apresenta maior teor de argila. Todos os horizontes são eutróficos, apresentando menores valores de saturação por bases no horizonte 3Cg (74,26%), onde predomina a fração arenosa ($978,17 \text{ g kg}^{-1}$). Essa variação está diretamente associada à textura, pois a argila favorece a adsorção de cátions devido às suas cargas negativas (Ronquim, 2012).

O P7 apresenta acidez elevada, com pH 5,5 (Ribeiro, 1999) e predominância de Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo sortivo. A SB ($6,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e CTC ($8,69 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) demonstram valores significativamente superiores aos observados nos demais Neossolos Litólicos analisados (P2, P7 e P8).

Considerando o perfil P1 possuir horizonte B textural conjugado com argila de atividade alta e eutrofia na maior parte dos primeiros 100 cm, não apresentar caráter crômico, e apresentar horizonte que também atende aos critérios de horizonte vértico, este solo foi classificado como Luvissole Háptico Órtico vertissólico. Este solo ocorre apenas no sudoeste da área de estudo, em posição de terço superior e topo de encosta.

Nos solos P2 e P7, a sequência de horizonte A com contato lítico dentro de 50 cm e eutrofia, os identificam como Neossolos Litólicos Eutróficos típicos. P9 apresenta características similares, porém, apresenta contato lítico fragmentário e é classificado como Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário. Os perfis P8 e P10 também contam



com sequência de horizonte A com contato lítico fragmentário dentro de 50 cm, mas não apresentaram eutrofia, sendo classificados como Neossolos Litólicos Distróficos fragmentários. Dentre os Neossolos, apenas P4 apresentou contato lítico fragmentário abaixo dos 50 cm de profundidade e, considerando sua eutrofia, foi classificado como Neossolo Regolítico Eutrófico leptofragmentário. Na área de estudo, os Neossolos são os tipos de solos de maior distribuição espacial, estando presentes em todas as posições da paisagem e diferentes declives.

Os dois perfis observados em posições inferiores da paisagem, e que apresentam influência direta de processos relacionados a ambientes fluviais ou fluvio-lacustres, classificam-se como Neossolos Flúvicos. Em P3 há horizonte A sob sequência de horizontes C com caráter flúvico a partir de 40 cm de profundidade, com textura predominantemente arenosa, e soma de bases relativamente elevada para solos com esta granulometria, sendo identificado como Neossolo Flúvico Psamítico êutrico. Já em P6, há a mesma sequência de horizonte A sob horizontes C com caráter flúvico a partir de 20 cm de profundidade, porém, neste local os horizontes subsuperficiais atendem aos critérios de horizonte glei, e há argila de atividade alta conjugada com eutrofia, caracterizando-o como um Neossolo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico.

Potencialidades e limitações

Diferentes classes de solos apresentam potencialidades e limitações ao uso agrícola que devem ser consideradas para o planejamento de uso das terras, principalmente em áreas de condições climáticas instáveis, como o caso do Semiárido nordestino. Nesse sentido, os Luvisolos destacam-se por seu potencial agrícola, principalmente devido às suas bases trocáveis (Leite, 2022), com destaque para os cátions disponíveis K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , os quais conferem uma boa capacidade nutricional ao solo. Segundo Cunha et al. (2010) os Luvisolos, geralmente situados em relevo suave ondulado, favorecem o uso de máquinas agrícolas quando apresentam baixos teores de cascalhos e calhaus. No entanto, o uso destes solos requer práticas conservacionistas, devido à susceptibilidade à perda de nutrientes por erosão, mesmo quando presentes em relevo suave ondulado (Gajic et al., 2013).

Outra preocupação quanto ao uso destes solos está na baixa disponibilidade hídrica, caso seu horizonte B textural ocorra em maiores profundidades, que pode impor restrições e limitar seu uso, principalmente em culturas de sequeiro, como milho e feijão (Leite, 2022). Além disso, no caso do Luvisolo Háplico Órtico vertissólico estudado neste trabalho, se torna necessário considerar as limitações associadas ao horizonte Bt de caráter vértico. As características vérticas conferidas a este horizonte podem provocar o seu endurecimento e fendilhamento durante épocas de estiagem, dificultando o crescimento radicular.



Em períodos chuvosos, esse horizonte tende a apresentar alta plasticidade e pegajosidade - o que interfere na atuação das máquinas, porém, o horizonte Bt retém água/umidade por mais tempo seja pelo seu maior teor de argila, ou pela quebra de capilaridade originada a partir do gradiente textural, caracterizada por uma descontinuidade na distribuição do tamanho de poros entre os horizontes arenoso/argiloso (Resende et al., 2019). Neste contexto, solos com gradiente textural, como os Luvisolos, apresentam capacidade de retenção de água por maior tempo do que solos que apresentam textura homogênea entre seus horizontes, e deste que não possuam horizontes superficiais muito espessos podem apresentar melhor aptidão agrícola (Criado et al., 2021).

No caso dos Neossolos Flúvicos, conforme Cunha et al. (2010), são considerados potencialmente satisfatórios ao uso agrícola, em razão da sua posição na paisagem, em áreas mais baixas e de várzea. No Semiárido nordestino, grande parte das práticas agrícolas têm sido desenvolvidas em leitos de rios intermitentes, açudes e barramentos, aproveitando o baixar das águas (Resende et al., 2019).

Segundo Leite (2022), as principais limitações ao uso dos Neossolos Flúvicos são a susceptibilidade a alagamentos, presença de lençol freático aflorado próximo à superfície, seu reduzido potencial nutricional e sua textura fina, que pode estabelecer dificuldades quanto a utilização de maquinário agrícola. Em contrapartida, se situados em área de boa drenagem, podem ser viáveis ao cultivo e fornecer boas produções. No caso dos solos estudados, apresentam textura predominantemente arenosa que pode prejudicar a sua utilização pela baixa capacidade de retenção de água comum em solos arenosos.

Os Neossolos Litólicos, conforme evidenciado por Leite (2022), destacam-se como uma das classes de solo mais limitantes para as práticas agrícolas. Essa limitação deve-se principalmente à sua profundidade rasa, elevada pedregosidade e rochosidade, além da frequente ocorrência em áreas de relevo acidentado e encostas íngremes. Esses fatores não apenas dificultam a mecanização agrícola, mas também potencializam o risco de erosão.

A pouca profundidade desses solos pode interferir diretamente no desenvolvimento radicular das plantas, problema intensificado em regiões com secas prolongadas, como o Seridó Potiguar. O potencial nutricional destes solos varia conforme a composição do material de origem e as condições climáticas locais. Ainda que Resende et al. (2019) sugiram uma associação direta entre os Neossolos Litólicos Eutróficos e as rochas quartzíticas, os resultados deste estudo não corroboram com esta relação, tendo como embasamento rochoso o Gnaisse.

Por fim, os Neossolos Regolíticos, frequentemente encontrados no Nordeste brasileiro, apresentam boa capacidade de absorção de água, apesar de sua textura



arenosa (Resende et al., 2019). As principais restrições desses solos estão associadas à sua granulometria de caráter arenoso que condicionam a permeabilidade e erodibilidade do solo (Cunha et al., 2008). Ainda que a granulometria essencialmente composta pela fração areia possa sugerir limitações agrícolas, esses solos são utilizados devido à presença de minerais primários mais resistentes ao intemperismo, os quais garantem aos Neossolos Regolíticos uma maior reserva mineral (Cunha et al., 2010), além de sua profundidade ser maior do que dos Neossolos Litólicos e propiciar sua utilização em alguns casos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho destaca uma parcela da diversidade pedológica da região do Seridó Potiguar, com implicações diretas para o planejamento e desenvolvimento agrícola sustentável na região. Ainda que sejam observados predominância de solos com restrições físicas, químicas e mecânicas, como o caso dos Neossolos Litólicos e Neossolo Regolítico Eutrófico leptofragmentário, houve a identificação de unidades pedológicas contrastantes e com maior potencial agrícola, como o Luvisso Háplico Órtico vertissólico, o Neossolo Flúvico Psamítico êutrico, e para utilização sazonal o Neossolo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de abordagens específicas para o manejo destes solos, considerando as particularidades do contexto Semiárido, ao qual o assentamento se insere.

Agradecimentos:

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – GEOCERES/UFRN e Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) da UFRN pelo financiamento da pesquisa, ao Instituto de Gestão das Águas (IGARN), à Secretária do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), à Federação dos Trabalhadores Rurais Agricultores e Agricultoras Familiares do Rio Grande do Norte (FETARN) e aos assentados da Agrovila Raimundo Nonato.



REFERÊNCIAS

- ALHO, Denise Rodrigues.; MARQUES JUNIOR, José; CAMPOS, Milton Cezar Costa. Caracterização física, química e mineralógica de Neossolos Litólicos de diferentes materiais de origem. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.** Recife, v.2, n.2, p.117-122, 2007.
- ALVARES, Clayton Alcarde; SATATE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo César; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p.711–728, 2014.
- ANGELIM, Luiz Alberto de Aquino. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- BRASIL. **Câmara dos Deputados. Relatório Síntese do Orçamento Fiscal e da Seguridade Social: Exercício Financeiro de 2011**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2011. Disponível em: https://www.camara.leg.br/internet/comissao/index/mista/orca/orcamento/OR2012/fiscobras2011_sintetico/sintetico/sintetico_2011_71.pdf. Acesso em: 14/02/2025
- BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3ª ed. Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. Porto Alegre, RS: Editora Bookman, 2013. 685 p.
- CASTRO, César Nunes de; CERZINI, Monise Terra. **O Projeto de integração do Rio São Francisco, obras complementares para o aumento da oferta hídrica e convivência com as secas**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), n. 2807, 2022. 57p.
- CHENG, Shi; HONG, Hanlie; JI, Kaipeng; LI, Fan; WANG, Xinghong. New insight into biotite weathering in the subtropic Tongcheng granite regolith, Hubei Province, South China. **Applied Clay Science**, v. 224, 2022.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnóstico do município de Jucurutu, estado do Rio Grande do Norte. Recife, PE: CPRM/PRODEEM, 2005.
- CRIADO, Marco; MARTINEZ-GRAÑA, Antonio; SANTOS-FRANCÉS, Fernando; MERCHÁN, Leticia. Improving the management of a semi-arid agricultural ecosystem through digital mapping of soil properties: the case of Salamanca (Spain). **Agronomy**, v. 11, n. 6, 2021.
- CUNHA, Tony Jarbas Ferreira et al. Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. *In*: SÁ, Iêdo Bezerra; SILVA, Pedro Carlos Gama da. **Semiárido brasileiro: pesquisa desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.
- CUNHA, Tony Jarbas Ferreira et al. **Solos do Submédio do Vale do São Francisco: potencialidades e limitações para uso agrícola**. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2008.
- DIAS, Pollyana Mona Soares. **Levantamento de solos e classificação da capacidade de uso das terras no projeto de Assentamento Moacir Lucena, Apodi – RN**. 2018. 104f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água). Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Procedimentos Normativos de Levantamentos Pedológicos**. Brasília, DF: EMBRAPA, 1995. 101p.
- GAJIC, Bosko; TAPANAROVA, Angelina; TOMIC, Zorica; KRESOVIC, Branka; VUJOVIC, Dragan; PEJIC, Borijov. Land use effects on aggregation and erodibility of Luvisols on undulating slopes. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 8, p. 1198-1204, 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430p.
- JACOMINE, Paulo Klinger Tito et al. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: MA-DNPEA/SUDENE-DRN, 1971. 536 p.
- LEITE, Maria José de Holanda. Características gerais dos principais solos da região Semiárida. **Revista Científica Multidisciplinar**, v.3, n.10, 2022.
- MEDEIROS, Léa Cristina.; MEDEIROS, Bruno Vinícius Valle; ERNESTO SOBRINHO, Francisco; GURGEL, Marcelo Tavares. Caracterização físico-química de um Neossolo Litólico na região Seridó do RN. **ACSA–Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v.9, n.4 , p.01 -07, out /dez 2013.



PREZOTTI, Luiz Carlos; GUARÇONI M., André. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória, ES: Incaper, 2013. 104p.

RESENDE, Mauro; CURI, Nilton; POGGERE, Giovana Clarice; BARBOSA, Julierme Zimmer; POZZA, Adélia Aziz Alexandre. **Pedologia, fertilidade, água e planta: inter-relações e aplicação**. Lavras: Ed. UFLA, 2019.

RIBEIRO, Antônio Carlos; GUIMARÃES, Paulo Tácito Gontijo; ALVAREZ V, Victor Hugo. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: SBCS, 1999. 359p.

RIBEIRO, Mateus Rosas; SAMPAIO, Everardo Valadares de Sá Barreto; GALINDO, Isabel Cristina Luma. Os solos e o processo de desertificação no Semiárido brasileiro. *In*: RIBEIRO, Mateus Rosas; NASCIMENTO, Clístenes Williams A.; RIBEIRO FILHO, Mateus Rosas; CANTALICE, José Roman Barros. **Tópicos em Ciência do Solo**. vol. 6. **Viçosa, MG**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.

RONQUIM, Carlos César. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas, SP: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 2010. 26p.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7ª ed., Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, 102 p.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6ª ed, rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA Solos, 2025. 393p.

SANTOS, Jean Cheyson Barros. **Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do estado do Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal Rural do Pernambuco, Recife, 2011.

SANTOS, Jean Cheyson Barros; SOUZA JÚNIOR, Valdomiro Severino.; CORRÊA, Marcelo Metri; RIBEIRO, Mateus Rosas.; ALMEIDA, Maria da Conceição; BORGES, Lucila Ester Prado. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **R. Bras. Ci. solo**, vol. 36, n. 3, p. 683-695, jun/2012.

SILVA, Nivia Regina. **Etnopedologia e qualidade do solo no assentamento Roseli Nunes, Piraí-RJ**. Dissertação (Mestrado Profissional em Agrossistemas) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SILVA, Roberto Marinho Alves. ENTRE DOIS PARADIGMAS: combate à seca e convivência com o Semiárido. **Sociedade e Estado**, Brasília, v. 18, n. 1/2, p. 361-385, jan./dez. 2003.

SILVA, Thaís Santos; VASCONCELOS, Rosiglay Cavalcante. Políticas sociais e conflitos rurais: limites e perspectivas do reassentamento involuntário das famílias rurais do entorno do território estratégico de Suape/PE. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISADORAS/ES EM SERVIÇO SOCIAL, 16., 2018: Vitória, ES. **Anais eletrônicos** [...] Universidade Federal do Espírito Santo, v. 1, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/abepss/article/view/22652>. Acesso em: 16/04/2025.

TEIXEIRA, Paulo César. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 573p.



CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS ANTRÓPICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PACIÊNCIA, ILHA DO MARANHÃO

Marly Silva de Morais¹

Gilberlene Serra Lisboa²

José Fernando Rodrigues Bezerra³

Regina Célia de Oliveria⁴

PALAVRAS-CHAVE: Função da Paisagem, Sistemas Antrópicos, Rio Paciência.

RESUMO

A bacia do rio Paciência localiza-se na região metropolitana de São Luís, Ilha do Maranhão, Brasil, abrange uma área de 151,33 km² e situa-se em uma região de transição entre áreas urbanas e rurais dos municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa. Este estudo teve como objetivo caracterizar os sistemas antrópicos da bacia, avaliando sua dinâmica paisagística e impactos ambientais, com vistas ao planejamento e gestão territorial. Adotou-se a abordagem geossistêmica, combinada com técnicas de geoprocessamento no ArcGIS e imagens de satélite, além de atividades de campo. Foram identificados cinco sistemas antrópicos principais: Urbano, Rural, Extrativista, de Uso Natural Protegido/em Conservação e de Uso Natural Degradado. O sistema Urbano, predominante (53,84%), reflete a expansão desordenada de áreas residenciais e comerciais, enquanto sistemas como o Manguezal (6,60%) sofrem pressão antrópica crescente. A degradação ambiental é agravada pelo lançamento de esgoto não tratado, que compromete a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos. Os resultados evidenciam uma transformação significativa da paisagem a partir da década de 1980, impulsionada por industrialização e urbanização, com consequências como perda de biodiversidade e conflitos socioambientais. Conclui-se que a bacia requer políticas integradas de ordenamento territorial, saneamento básico e conservação de ecossistemas críticos, como manguezais, para garantir uma gestão eficiente.

1 Doutoranda do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - SP
marlymorais22@hotmail.com

2 Doutoranda do Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro- RJ
gilberlene_ok@hotmail.com

3 Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Maranhão – MA
fernangeo@yahoo.com.br

4 Professora do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Campinas – SP
regina5@unicamp.br



INTRODUÇÃO

A gestão integrada e o planejamento de bacias costeiras vêm ganhando crescente atenção na literatura ambiental contemporânea, especialmente em contextos em que a pressão urbana e rural compromete os ecossistemas costeiros. Segundo a Reef Resilience Network (2023), estratégias eficazes envolvem o engajamento de múltiplos atores (incluindo autoridades governamentais, populações locais e setores produtivos) e a criação de instituições multissetoriais com mandatos claros e financiamento estável para coordenar ações em toda a bacia, de montante a jusante. Essa abordagem multiescalar e participativa é crucial para preservar a qualidade da água, proteger recifes e garantir saúde pública (Reef Resilience Network, 2023).

As bacias hidrográficas costeiras representam sistemas complexos onde se entrelaçam processos ecológicos e transformações antrópicas. Essa interface singular entre terra e mar configura territórios de alta sensibilidade ambiental, onde o uso dos recursos naturais frequentemente ultrapassa os limites da sustentabilidade (LIMA et al., 2022).

No Brasil, a integração da gestão de recursos hídricos com o gerenciamento costeiro ainda enfrenta desafios institucionais significativos: os instrumentos regulatórios muitas vezes separam os domínios da água doce da zona costeira, fragmentando a abordagem territorial. Estudos recentes demonstram que mais de 60% dos ecossistemas costeiros no Nordeste brasileiro apresentam sinais de degradação acelerada, com destaque para a perda de manguezais e assoreamento de corpos hídricos (PROJETO COSTEIRO, 2023).

Nicolodi et al. (2009) enfatizam que o contínuo flúvio-marinho requer delimitação baseada em gradientes ecológicos e hidrológicos, e não apenas em critérios administrativos. A ausência dessa integração impede ações coordenadas que considerem os impactos da ocupação da bacia sobre os estuários e zonas marinhas adjacentes.

Nesse cenário, o planejamento baseado em bacias hidrográficas emerge como alternativa para conciliar proteção ambiental e desenvolvimento territorial. A experiência brasileira com os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs), embora ainda com desafios de implementação, revela o potencial dessa abordagem integrada (BRASIL, 2022). Na prática, essa perspectiva permite: Identificação de zonas críticas de conflito socioambiental, Priorização de ações conforme a vulnerabilidade específica de cada setor e Integração de saberes técnicos e tradicionais no processo decisório que.

A bacia hidrográfica do rio Paciência, localizada na Ilha do Maranhão, configura-se como um espaço geocológico singular, onde a interação entre sistemas naturais e antrópicos molda uma paisagem dinâmica e complexa. Com uma área de 151,33 km², essa bacia está situada em uma zona de transição entre os municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, apresentando uma diversidade de



ecossistemas costeiros, como manguezais, restingas e áreas alagáveis, que coexistem com intensa ocupação humana (ROCHA et al., 2021). Essa conjunção de fatores a torna um laboratório natural para estudos sobre os impactos das atividades humanas em bacias urbanas, especialmente no contexto do Nordeste brasileiro, onde a pressão antrópica sobre os recursos hídricos e a biodiversidade tem se intensificado nas últimas décadas.

Além da complexidade ambiental, a bacia também se configura como um espaço de disputa territorial e pressão por expansão urbana. A ausência de planejamento integrado e de infraestrutura urbana adequada intensifica os conflitos socioambientais, como a ocupação de áreas de preservação permanente, o assoreamento de cursos d'água e a vulnerabilidade das populações de baixa renda que habitam regiões de risco. A gestão ambiental da bacia exige, portanto, abordagens interdisciplinares que considerem a estrutura e o funcionamento dos sistemas naturais e antrópicos.

Os sistemas antrópicos, conforme abordados por Rodriguez et al. (2022), referem-se às estruturas espaciais criadas ou modificadas pela ação humana, as quais interagem com os sistemas naturais, gerando novas dinâmicas na paisagem. Na bacia do Rio Paciência, esses sistemas manifestam-se de forma heterogênea, abrangendo desde áreas urbanas densamente povoadas até zonas rurais com atividades agropecuárias e extrativistas. A expansão desordenada da malha urbana, associada à industrialização e à falta de saneamento básico, tem levado à fragmentação de habitats naturais, à contaminação dos corpos hídricos e à perda de serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação do ciclo hidrológico e a proteção costeira (IBGE, 2020).

Sob a perspectiva da geoecologia da paisagem, Rodriguez et al. (2022), a bacia do Rio Paciência pode ser compreendida como um geossistema em constante transformação, onde os processos físicos, biológicos e sociais se inter-relacionam. Essa abordagem permite analisar como a ocupação humana redefine a estrutura e a função da paisagem, alterando, por exemplo, a infiltração de água no solo, a qualidade dos ecossistemas aquáticos e a resiliência frente a eventos climáticos extremos. Estudos recentes, como os de Silva et al. (2023), demonstram que a substituição de áreas naturais por infraestruturas urbanas na bacia aumentou em 40% o risco de inundações em períodos chuvosos, evidenciando a vulnerabilidade socioambiental gerada por esse modelo de desenvolvimento.

Nesse contexto, este artigo busca caracterizar os sistemas antrópicos da bacia do Rio Paciência, utilizando como base a metodologia geossistêmica de Rodriguez et al. (2022), associada a técnicas de geoprocessamento e análises de campo. Parte-se da hipótese de que a paisagem atual resulta de um processo histórico de sobreposição de atividades econômicas (urbanização, agricultura, extrativismo) que, na ausência de planejamento



territorial, acentuam conflitos socioambientais e comprometem a sustentabilidade da bacia. Além disso, o estudo visa contribuir para o debate sobre gestão integrada de bacias hidrográficas em regiões metropolitanas, propondo diretrizes que conciliem conservação ambiental e desenvolvimento urbano.

A relevância desta pesquisa justifica-se pela escassez de trabalhos que integrem análises geoecológicas e socioeconômicas na bacia do Rio Paciência, especialmente em um momento em que a região enfrenta desafios como: Crescimento urbano acelerado: A população da bacia aumentou 25% entre 2010 e 2022 (IBGE, 2022), com ocupações irregulares em áreas de preservação permanente (APPs).

Assim, os resultados deste estudo poderão subsidiar políticas públicas locais, como revisões do Plano Diretor Municipal e a implementação de Planos de Bacias, além de fortalecer estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo¹ adota como fundamentação metodológica a abordagem de análise ambiental sistematizada por Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2022), estruturando-se nas etapas sequenciais de: organização, inventário, análise, diagnóstico e prognóstico. O mapa de Sistemas Antrópicos da área de estudo foi elaborado com base no mapeamento do uso e cobertura da terra em escala cartográfica de 1:50.000.

Para a geração do referido mapa, foram adquiridas imagens do satélite Sentinel-2B, sensor MultiSpectral Instrument (MSI), correspondentes às cenas 23MPS, 23MQS e 23MQT, datadas de 22 de setembro de 2022, obtidas por meio de download na plataforma do Programa Copernicus.

As imagens foram processadas no ambiente do software QGIS 3.28.3, onde foram executadas diversas etapas de geoprocessamento, seguindo os critérios metodológicos estabelecidos por Escada (2003) e Sano et al. (2013). No quadro a seguir as etapas e sua respectiva descrição.

1 Este trabalho integra uma tese de doutorado em desenvolvimento, originalmente financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do processo nº 88887.510964/2020-00, com vigência até novembro de 2022. Atualmente, o projeto conta com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), sob o processo nº BD-10767/22.



QUADRO 1: Etapas Técnicas de Processamento Digital de Imagens

ETAPA TÉCNICA	DESCRIÇÃO
Correção atmosférica	Remoção dos efeitos atmosféricos (aerosóis, vapor d'água) nas imagens, a fim de obter valores espectrais mais precisos e comparáveis.
Filtro de contraste linear	Aplicação de ajustes para realçar as diferenças entre os tons da imagem, facilitando a identificação de feições e a segmentação posterior.
Mesclagem (mosaico)	Combinação das diferentes cenas do satélite para formar uma única imagem contínua da área de estudo.
Recorte do raster	Delimitação da área de interesse (bacia hidrográfica) a partir do recorte da imagem, utilizando uma camada vetorial de referência.
Segmentação orientada a objetos	Agrupamento de pixels semelhantes em regiões (segmentos) com base em critérios espectrais, espaciais e de textura, utilizando o algoritmo de regiões.
Extração de atributos	Cálculo de métricas como média, desvio padrão e variância para cada segmento, que servirão como base para a classificação.
Coleta de amostras de treinamento	Seleção de polígonos representativos de cada classe de uso e cobertura da terra, utilizados para treinar o algoritmo de classificação.
Classificação supervisionada (RF)	Aplicação do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest, que utiliza os dados amostrados para atribuir rótulos às demais regiões.
Validação dos resultados	Avaliação da precisão da classificação com base em dados de campo e imagens aéreas, garantindo a confiabilidade do mapeamento final.

FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.

As bandas multiespectrais foram empilhadas em um único arquivo de leitura (stacking) e exportadas em formato VRT. A partir disso, foi aplicada a segmentação da imagem utilizando o algoritmo de crescimento de regiões, técnica amplamente reconhecida por sua robustez em agrupar pixels adjacentes com base em similaridade espectral e espacial a partir de um pixel semente.

Na sequência, foi realizada a extração dos atributos dos segmentos, com base em abordagem estatística, considerando as métricas de média, desvio padrão e variância dos valores espectrais.

A etapa de amostragem supervisionada visou treinar o classificador de uso e cobertura da terra. A classificação foi realizada com o uso do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest (RF), conforme diretrizes metodológicas descritas em Pereira et al. (2023).



A validação da classificação foi conduzida com base em dados empíricos, por meio de atividades de campo e fotografias aéreas registradas nos anos de 2023 e 2024, assegurando a consistência temática e acurácia do mapeamento.

Ao final do processo, foi gerado um mapa temático contendo nove classes de uso e cobertura da terra, definidas com base na adaptação das tipologias propostas por Gerco Maranhão (1998), no Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012) e no Manual Técnico de Uso e Cobertura da Terra (IBGE, 2013).

A partir da classificação obtida, os Sistemas Antrópicos da bacia hidrográfica do rio Paciência foram organizados em cinco grandes sistemas, definidos com base nos distintos processos de ocupação e transformação da paisagem. Cada sistema é constituído por subsistemas que apresentam características próprias que os individualizam. A bacia foi, portanto, classificada nos seguintes sistemas: Urbano, Rural, Extrativista, de Uso Natural Protegido/em Conservação e de Uso Natural Degradado.

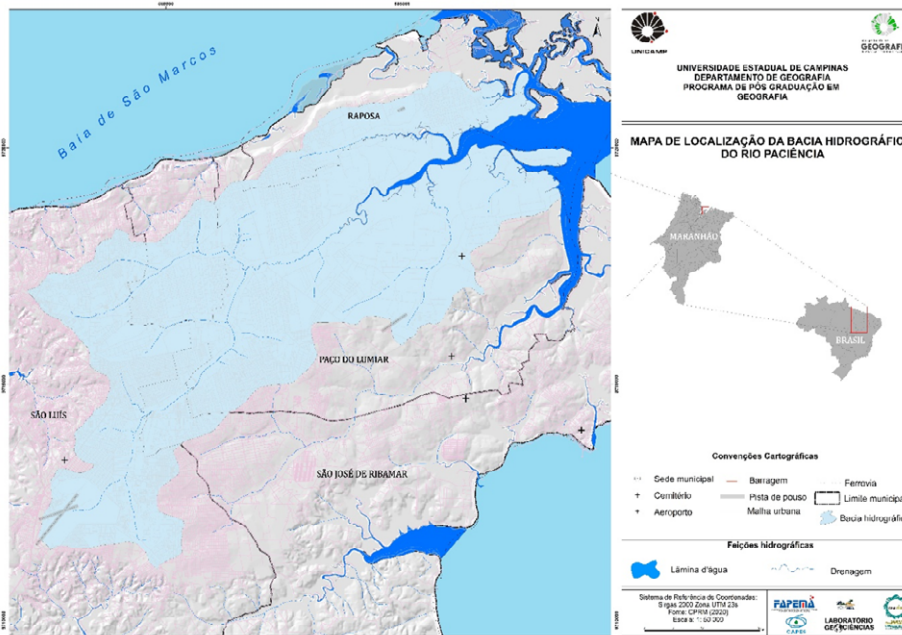
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paciência, com 151,33 km² de extensão, é uma paisagem marcada por uma intensa transição entre áreas urbanas e rurais, envolvendo os municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa (Figura 1). Essa configuração espacial heterogênea resulta em uma paisagem dinâmica e complexa, na qual a interação entre os sistemas naturais e os sistemas antrópicos determina o padrão de uso e ocupação.

Os Sistemas Antrópicos, neste trabalho, correspondem à complexa relação entre os sistemas de uso e cobertura da terra existentes, associados aos aspectos socioeconômicos dos municípios e às áreas protegidas pelas unidades de conservação presentes na bacia. Essa integração dos fatores ambientais e humanos revela os desafios e potencialidades para o planejamento e a gestão ambiental, destacando a necessidade de estratégias que conciliem o desenvolvimento socioeconômico com a conservação dos ecossistemas locais ainda presentes.



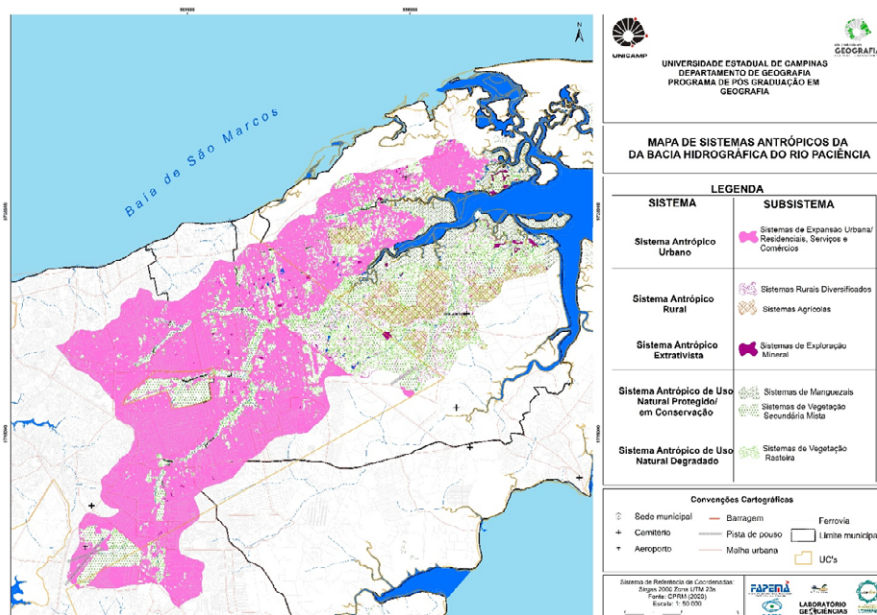
FIGURA 1: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paciência



FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.

A partir da classificação obtida, os Sistemas Antrópicos da Bacia Hidrográfica do Rio Paciência foram organizados em cinco grandes sistemas, definidos com base nos distintos processos de ocupação e transformação da paisagem. São eles: o Sistema Antrópico Urbano, o Sistema Antrópico Rural, o Sistema Antrópico Extrativista, o Sistema Antrópico de Uso Natural Protegido/em Conservação e o Sistema Antrópico de Uso Natural Degradado (Figura 2). Esses sistemas se desdobram em sete subsistemas, que representam a diversidade de funções e interferências antrópicas na paisagem da bacia.

FIGURA 2: Mapa dos Sistemas Antrópicos da bacia hidrográfica do rio Paciência



FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.



No Sistema Antrópico Urbano tem-se o Subsistema de Expansão Urbana/Residenciais, Serviços e Comércios, com 53,84% (Tabela 1) da área total da bacia, representa a categoria mais expressiva. Nele se concentram áreas residenciais formais e informais, empreendimentos imobiliários, comércios e serviços (Figura 3). Sua rápida expansão está relacionada à dinâmica populacional da Ilha de São Luís desde a década de 1980, impulsionada por projetos industriais e logísticos, que induziram a ocupação desordenada da bacia. Esse processo tem resultado na impermeabilização do solo, aumento do escoamento superficial e da poluição hídrica, agravando o quadro de degradação ambiental da região conforme apontado por Cavalcanti Júnior, 2016 e Rocha et al., 2021.

TABELA 1: Sistemas Antrópicos da bacia hidrográfica do rio Bacanga: Classificação e Percentual de Ocorrência

SISTEMA	SUBSISTEMA	%
Sistema Antrópico Urbano	Subsistema de Expansão Urbana/ Residenciais, Serviços e Comércios	53,84
Sistema Antrópico Rural	Sistemas Rurais Diversificados	7,26
	Sistemas Agrícolas	4,62
Sistema Antrópico Extrativista	Sistema de Exploração Mineral	0,66
Sistema de Uso Natural Protegido/em Conservação	Sistemas de Manguezais	6,6
	Vegetação Secundária Mista	13,53
Sistema de Uso Natural Degradado	Vegetação Rasteira	14,49

FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.



FIGURA 3: Vista parcial aérea do Subsistema de Expansão Urbana/Residenciais, Serviços e Comércios, divisa dos municípios de São Luís e São Jose de Ribmar



FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.

O Sistema Antrópico Rural inclui os Sistemas Rurais Diversificados e Sistemas Agrícolas. Os Sistemas Rurais Diversificados, compreendem 7,26% da bacia, são áreas onde coexistem atividades agrícolas, pecuárias e extrativistas em pequena escala. Em muitos casos, são espaços manejados por comunidades tradicionais que mantêm práticas compatíveis com a conservação ambiental, como a coleta seletiva de frutos e uso de roçados itinerantes. Apesar disso, a ausência de políticas públicas específicas para essas áreas contribui para sua vulnerabilidade frente ao avanço de empreendimentos urbanos.

Os Sistemas Agrícolas, responsáveis por 4,62% da área, são compostos por cultivos temporários e permanentes, em geral associados à agricultura de subsistência e às monoculturas. Segundo Araújo et al., 2019 sua distribuição está mais concentrada no médio curso da bacia, onde ocorrem práticas como o uso de queimadas e o preparo do solo com baixo nível tecnológico, o que agrava a degradação física e química do solo.

O Sistema Antrópico Extrativista é representado apenas pelo Sistema de Exploração Mineral, ainda que com apenas 0,66% da área, apresenta alto impacto ambiental. As atividades de extração de areia e argila modificam intensamente a paisagem, suprimem a vegetação, promovem instabilidade do solo e intensificam os processos erosivos. Conforme Ramos Pestana et al., 2018 tais áreas, geralmente desprovidas de controle ambiental efetivo, tornam-se focos de degradação intensiva dos corpos d'água e das áreas de recarga aquífera .

O Sistema de Uso Natural Protegido/em Conservação contempla os subsistemas de Sistemas de Manguezais e de Vegetação Secundária Mista. Os manguezais, que



ocupam 6,60% da bacia, configuram-se como um dos ecossistemas mais sensíveis e ecologicamente relevantes do território, prestando diversos serviços ecossistêmicos, como proteção costeira contra erosão, filtragem natural de poluentes, sequestro de carbono atmosférico e abrigo para uma rica biodiversidade aquática, incluindo espécies com valor ecológico e econômico.

Além dessas funções, os manguezais da bacia são também fundamentais para a manutenção da pesca artesanal de subsistência, uma prática tradicional exercida por comunidades locais que dependem diretamente desses ambientes para alimentação e renda (Figura 4). No entanto, esses ecossistemas vêm sendo fragmentados e suprimidos pelo avanço urbano e pelo lançamento de efluentes sem tratamento nos cursos d'água (Silva e Santos, 2021). A redução da cobertura de mangue compromete diretamente a biodiversidade costeira e a capacidade de autorregulação dos ambientes estuarinos.

FIGURA 4: Subsistema de Manguezal na foz da bacia hidrográfica do rio Paciência, município de Paço do Lumiar



FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.

A Vegetação Secundária Mista, com 13,53%, forma o terceiro subsistema mais representativo. Trata-se de áreas de capoeira, mata secundária de terra firme e palmáceas, originadas da supressão da vegetação original e de práticas agrícolas de subsistência.



A persistência desses fragmentos vegetais, ainda que degradados, desempenha papel relevante na manutenção do microclima, na recarga hídrica e na conectividade ecológica da bacia, especialmente nas bordas das unidades de conservação (Figura 5).

FIGURA 5: Vista parcial aérea do Subsistema de Vegetação Secundária Mista no município de Paço do Lumiar



FONTE: Elaborado pelos autores, 2025.

O Sistema de Uso Natural Degradado corresponde ao subsistema de Vegetação Rasteira. É o segundo maior, representando 14,49% da bacia. Esse subsistema é constituído por formações vegetais herbáceas ou arbustivas esparsas, frequentemente associadas a áreas em regeneração natural ou sujeitas a queimadas e desmatamentos. Tais processos comprometem a integridade dos solos, favorecem a erosão e reduzem a biodiversidade local (Silva et al., 2020).

Por fim, ressalta-se a presença de duas unidades de conservação na bacia: a APA do Itapiracó e parte da UPAN Açú-Miritiba-Alto Preguiças. A APA do Itapiracó, com cerca de 322 hectares, ocupa 6,37% da área da bacia e cumpre papel estratégico na regulação climática, proteção de nascentes e oferta de espaços para lazer e educação ambiental. Criada em 1997, essa unidade abriga fragmentos de mata de terra firme, além de



infraestrutura pública voltada à recreação. Contudo, sofre impactos como o lançamento de esgoto doméstico, ocupações irregulares e falta de gestão integrada, demandando ações urgentes de planejamento e recuperação (Rodrigues, 2023; SEMA, 2018).

Dessa forma, os sistemas antrópicos identificados revelam uma paisagem em transformação acelerada, marcada pela fragmentação ecológica, perda de vegetação nativa e intensificação da urbanização. A gestão da Bacia do Rio Paciência deve considerar essa diversidade de usos e impactos, propondo instrumentos que articulem conservação, uso sustentável e recuperação ambiental com base em critérios técnico-científicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização dos sistemas antrópicos da Bacia Hidrográfica do Rio Paciência evidencia um território em constante transformação, cuja paisagem reflete a sobreposição de lógicas de uso desiguais e, muitas vezes, conflitantes. A predominância do sistema urbano e a redução significativa de áreas naturais apontam para um modelo de desenvolvimento baseado na expansão desordenada e na baixa resiliência ambiental. Os impactos desse processo são múltiplos: aumento da vulnerabilidade social, degradação dos corpos d'água, fragmentação da cobertura vegetal e comprometimento de serviços ecossistêmicos essenciais.

A presença de unidades de conservação, como a APA do Itapiracó e a UPAN Açú-Miritiba-Alto Preguiças, demonstra o potencial da bacia para a conservação da biodiversidade e a promoção de serviços ecossistêmicos. No entanto, a fragilidade na gestão dessas áreas e a pressão antrópica crescente indicam a necessidade de reestruturação dos instrumentos de planejamento e fiscalização ambiental. A bacia apresenta potencial para ações de recuperação de áreas degradadas, implantação de corredores ecológicos e promoção de práticas sustentáveis de uso do solo.

Além disso, é imprescindível que as políticas públicas considerem as especificidades socioeconômicas dos municípios inseridos na bacia, promovendo a inclusão das populações vulneráveis nos processos de decisão e na gestão participativa do território. A educação ambiental e o fortalecimento das instituições locais podem atuar como catalisadores de uma nova dinâmica territorial, baseada na sustentabilidade e na justiça socioambiental.

Portanto, este estudo reforça a importância da abordagem geossistêmica na análise da paisagem e aponta caminhos para uma gestão integrada da Bacia do Rio Paciência, capaz de equilibrar conservação ambiental, desenvolvimento urbano e qualidade de vida para as populações que dela dependem.



REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. A. P.; PESTANA, Y. M. R.; MANDAJI, C. M.; NUNES, G. S. Determinação de temperatura, pH e turbidez da água da bacia do rio Paciência. *CBQ*. 2019.
- CAVALCANTI JÚNIOR, F. A. **Zoneamento do escoamento superficial da bacia hidrográfica do Rio Paciência**. UNESP, 2016.
- COSTA, C. M. et al. **Mapeamento do risco real de inundações na região hidrográfica Apaco**. *SBGfA*. 2017.
- EA-USP (INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO). **Gestão de bacias hidrográficas e sustentabilidade**. São Paulo: IEA. 2020. Disponível em: <https://www.iea.usp.br/publicacoes/livros-impresos/gestao-de-bacias-hidrograficas-e-sustentabilidade>
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Censo Demográfico 2022: População e domicílios – resultados preliminares do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.
- NICOLODI, J. L.; DILLENBURG, S. R.; BARLETTA, R. C. Gerenciamento costeiro e gestão integrada de bacias hidrográficas: desafios e perspectivas. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 9(1), 43–56. 2009.
- RAMOS PESTANA, Y. M.; MANDAJI, C. M. et al. **Avaliação da contaminação por metais pesados em sedimentos**. *CBQ*. 2018.
- REEF RESILIENCE NETWORK. **Integrated Watershed Management: Solutions for Healthy Coastal Ecosystems and People**. 2023. Disponível em: <https://reefresilience.org/pt/article-summaries/integrated-watershed-management-solutions-for-healthy-coastal-ecosystems-and-people>
- R, M. C. da; PINHEIRO, K. S. F.; SOUSA, C. J. S. de; BEZERRA, J. F. R. **Saneamento e Qualidade das Águas na Bacia Hidrográfica do Rio Paciência, Ilha do Maranhão, Brasil**. *Revista Geotemas*, Pau dos Ferros, v. 11, p. e02103.2021 DOI: 10.33237/2236-255X.2021.3082. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/GEOTemas/article/view/3082>. Acesso em: 20 jul. 2025.
- RODRIGRES, V. V. **Aula de Campo em Geografia: Reserva do Itapiracó**. UEMA. 2023
- RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. D.; CAVALCANTI, A. P. B. **Geocologia da paisagem: uma visão ecossistêmica da análise ambiental**. 6. ed. Fortaleza: EDUFC. 332 p. 2022.
- SEMA – SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS. **Portaria nº 079/2018**. Governo do Maranhão. 2018.
- SILVA, G. I. F. A. et al. **Levantamento das características hidrogeológicas do Aquífero Barreiras e Itapecuru**. *Águas Subterrâneas*. 2020
- SILVA, G. R.; COSTA, C. B.; ALVES, M. A. **Zoneamento ambiental costeiro como ferramenta de gestão participativa: estudo de caso no litoral do Nordeste brasileiro**. *Cadernos Metrópole*, 23(53), 147–168.2021. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2021-5308>
- SILVA, J.; SANTOS, A. **Manguezais e sustentabilidade costeira na Ilha de São Luís**. *RCGS*. 2021.
- SOUZA, H. C. A.; LIMA, T. R.; AMORIM, P. A. **Planejamento territorial e gestão participativa de bacias hidrográficas costeiras: uma proposta metodológica para o contexto brasileiro**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27, e37. 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272020210085>



DINÂMICAS GEOMORFOLÓGICAS EM AMBIENTES GRANÍTICOS SEMIÁRIDOS: TAFONIZAÇÃO E HONEYCOMBS NO LAJEDO DE PAI MATEUS, CABACEIRAS (PB)

Nádson Ricardo Leite de Souza ¹

Júlia Stefane da Silva Vieira ²

Rafael Albuquerque Xavier (Orientador) ³

PALAVRAS-CHAVE: Processos subaéreos em granitos; Morfometria de microformas tafonizadas; Erosão alveolar em clima semiárido; Mapeamento geomorfológico detalhado.

RESUMO

O Lajedo de Pai Mateus, situado no município de Cabaceiras, na região popularmente conhecida como Cariri Paraibano, integra um notável sítio representativo da paisagem granítica esculpida por processos geomorfológicos singulares em ambientes semiáridos (Lajes et al., 2013; Souza et al., 2024). Este trabalho tem como objetivo analisar os processos de modelagem superficial que atuam na área, com ênfase na tafonização e na formação de feições alveolares conhecidas como *honeycombs*, que conferem ao sítio um aspecto morfológico peculiar e de grande valor científico e paisagístico. A problemática centra-se na compreensão das dinâmicas ambientais responsáveis pela gênese dessas microformas em um contexto climático marcado por longos períodos secos, amplitudes térmicas elevadas, chuvas irregulares e concentradas. A hipótese que norteia a investigação é de que tais formas resultam da interação entre a meteorização química, inicialmente favorecida pela percolação e retenção de água ao longo de descontinuidades estruturais e a meteorização física, manifestada pela desagregação granular e descamação progressiva das superfícies internas, sendo esses processos intensificados por fatores microambientais como acúmulo de umidade, salinização superficial, variações térmicas diárias e exposição solar diferencial (Twidale, 1982; Turkington; Paradise, 2005). Para investigar esses processos, foram adotadas abordagens geográficas integradas, com destaque para o mapeamento geomorfológico detalhado, registro sistemático das feições em campo, análise da orientação e morfometria das cavidades, correlação com elementos estruturais (como fraturas e diaclasamentos) e uso de técnicas geoespaciais, como análise topográfica por modelos digitais de elevação e fotogrametria por drone. Também foram consideradas variáveis climáticas e dados sobre cobertura do solo e variação sazonal

- ¹ Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campus I, João Pessoa-PB nad_ric@hotmail.com
- ² Doutoranda em Geografia pelo Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campus I, João Pessoa-PB, julia.vieira@academico.ufpb.br
- ³ Professor efetivo do Departamento de Geografia da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Campus I, Campina Grande-PB, xavierra@uol.com.br



de umidade. Os resultados obtidos envolvem a caracterização das formas tafonizadas quanto à sua morfologia, distribuição e associação com fatores estruturais e ambientais, além de um modelo explicativo que relacione os processos observados às condições semiáridas do Sertão Paraibano. Evidencia-se o papel da tafonização como processo ativo na evolução das paisagens graníticas da região e colabora-se com o entendimento sobre a atuação de processos morfogenéticos em contextos climáticos contrastantes. Esse estudo reforça a importância regional do Lajedo de Pai Mateus, reforçando sua relevância científica, educativa e turística, ao mesmo tempo em que propõe estratégias de leitura e interpretação ambiental adequadas à sua conservação e valorização.

INTRODUÇÃO

A dinâmica geomorfológica em ambientes graníticos sob regime semiárido apresenta características singulares decorrentes da interação entre fatores geológicos, climáticos, estruturais e biológicos. No contexto nordestino brasileiro, o Sertão da Paraíba, especificamente a área de Cabaceiras, constitui um exemplo notável dessa complexa interação, onde afloramentos graníticos são moldados por processos de intemperismo físico, químico e biológico em escalas micro e macromorfológicas. A paisagem granítica do Lajedo de Pai Mateus, marcada por matacões arredondados (*boulders*), lajedos suavemente inclinados e cavidades hemisféricas, oferece um laboratório natural para a compreensão de processos morfogenéticos em ambientes áridos e semiáridos (Brilha, 2016; Lima Filho et al., 2005; Vidal Romaní, 2000).

Neste cenário, destacam-se as feições tafonizadas e os padrões alveolares (*honeycombs*), cuja gênese e morfologia remetem a uma combinação complexa de controles litológicos, estruturais e microambientais. Tais formas não apenas constituem manifestações evidentes da evolução superficial das rochas graníticas, mas atuam também como bioindicadores de condições microclimáticas e processos microbiológicos em andamento (Viles & Gorbushina, 2003; Motti & Bonanomi, 2018). A presença de crostas biológicas, como líquens e cianobactérias, intensifica processos de biocorrosão mineral, contribuindo para o alargamento e aprofundamento progressivo das cavidades. Estes fatores, somados à ação da termoclastia e haloclastia, moldam um relevo de alta complexidade morfofuncional, sensível às variações ambientais e à intervenção antrópica (McCarroll, 1991; Dragovich, 1993).

A questão central que orienta este estudo reside na compreensão dos mecanismos responsáveis pela formação, distribuição e evolução das feições tafonizadas no Lajedo de Pai Mateus. Parte-se da hipótese de que a tafonização não ocorre de maneira aleatória, mas responde a condicionantes específicos como a orientação solar, a densidade de fraturas, a textura mineralógica e a presença de biofilmes fotossintetizantes. Nesse sentido, assume-se que há uma correspondência espacial entre zonas de maior radiação



solar, como as faces voltadas a oeste e sudoeste, e maior densidade de cavidades, conforme sugerem estudos internacionais em ambientes graníticos semiáridos e costeiros (Miller, 1970; Fitzgerald et al., 2006; Motti & Bonanomi, 2018).

Além do interesse geomorfológico, este trabalho reconhece o valor geocientífico e turístico do Lajedo de Pai Mateus, que figura como geossítio no inventário do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015), e cuja paisagem é frequentemente mobilizada por discursos simbólicos e culturais que reforçam seu potencial para o geoturismo interpretativo. No entanto, as feições tafonizadas estão entre as formas mais frágeis e suscetíveis à degradação por ação antrópica direta, como pisoteio, grafites e coleta indevida de amostras biológicas (Silva & Brilha, 2019). Assim, o estudo propõe também discutir estratégias de valorização e conservação dessas formas, alinhadas a princípios de geoconservação participativa e manejo sustentável da paisagem (Brilha, 2016; Newsome et al., 2013; Reynard et al., 2007).

Portanto, este artigo tem como objetivos: (i) descrever e interpretar as principais feições tafonizadas e alveolares presentes no Lajedo de Pai Mateus; (ii) identificar os condicionantes estruturais, microambientais e biológicos que influenciam sua gênese e distribuição; e (iii) propor diretrizes preliminares de gestão e valorização geoturística que integrem a preservação das feições com a experiência interpretativa dos visitantes. Espera-se, assim, contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre o intemperismo diferencial em rochas graníticas sob condições semiáridas e para a formulação de práticas integradas de conservação do patrimônio geomorfológico.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Lajedo de Pai Mateus está localizado na porção ocidental do Estado da Paraíba, inserido no município de Cabaceiras, a cerca de 190 km de João Pessoa. Esse geossítio encontra-se em uma das bordas do Planalto da Borborema, unidade morfoestrutural que se destaca por sua compartimentação tectônica, feições residuais e presença de maciços graníticos neoproterozoicos. A região é composta predominantemente por rochas da Suíte Serra da Engabelada, com granitos leucocráticos de coloração rosada a cinza-clara, textura porfirítica a equigranular, e mineralogia dominada por feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e biotita, além de acessórios como zircão, apatita e óxidos de ferro (Lima Filho et al., 2005; CPRM, 2015).

A estrutura geológica é caracterizada pela presença de foliação magmática, juntas de alívio e fraturas subverticais, que influenciam fortemente os padrões de intemperismo e a geometria dos blocos expostos. As fraturas atuam como condutos preferenciais para a infiltração de água e a circulação de soluções químicas, além de condicionarem o



escoamento superficial e a morfologia das cavidades. A densidade de fraturamento e a orientação das juntas são fundamentais para a segmentação do maciço em matacões, o que facilita a atuação dos processos tafonizantes ao longo de planos de fraqueza (Fitzgerald et al., 2006; Dragovich, 1993).

O clima local é classificado como BSh (semiárido quente), segundo a tipologia de Köppen-Geiger, com temperatura média anual superior a 26 °C e pluviosidade média inferior a 500 mm, concentrada em poucos meses do ano, notadamente entre fevereiro e maio (Alvares et al., 2013). A amplitude térmica diária é significativa, com variações superiores a 15 °C em determinadas épocas, o que favorece a termoclastia. A insolação é intensa, ultrapassando 3.000 horas anuais, e a umidade relativa do ar frequentemente permanece abaixo de 50%, criando um ambiente ideal para processos físicos de desagregação mineral.

A vegetação predominante é do tipo caatinga arbustiva aberta, com espécies adaptadas à escassez hídrica e solos rasos sobre rochas. A cobertura vegetal descontínua contribui para a exposição direta dos afloramentos rochosos, intensificando os efeitos da radiação solar e da evaporação. A ausência de sombreamento contínuo sobre os blocos graníticos permite a atuação desimpedida dos agentes de intemperismo físico, o que, por sua vez, contribui para a amplificação das formas tafonizadas e alveolares ao longo do tempo (McCarroll, 1991).

Através da ótica geomorfológica, o geossítio Lajedo do Pai Mateus é um exemplo típico de “campo de *tors*”, constituído por lajedos levemente inclinados intercalados com matacões arredondados, blocos isolados e cavernas rasas. O relevo suave e as formas arredondadas derivam da atuação prolongada de processos de alteração diferencial e esfoliação esferoidal, que ocorrem em subsuperfície antes da exumação dos blocos (Twidale, 1982; Vidal Romaní, 2000). A exposição dessas formas é intensificada pela remoção do regolito e pela erosão superficial, revelando feições pré-existentes que, posteriormente, evoluem por tafonização.

O Lajedo de Pai Mateus é reconhecido como geossítio pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015), sendo valorizado não apenas por sua geodiversidade, mas também por seu geopatrimônio. Diversos blocos abrigam inscrições rupestres e vestígios de ocupação pré-colonial, reforçando o caráter multifuncional da paisagem. A sobreposição de valores científicos, culturais e estéticos fortalece a necessidade de conservação integrada, destacando o local como um território privilegiado para o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares em geomorfologia, arqueologia, educação ambiental e turismo geológico (Brilha, 2016; Silva & Brilha, 2019).



PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS EM AMBIENTES GRANÍTICOS SEMIÁRIDOS – RESUMO

Em regiões semiáridas, como o Sertão da Paraíba, os maciços graníticos são modelados por uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos. A termoclastia, causada pelas variações térmicas diárias, fragiliza a rocha por microfraturamento (Fitzgerald et al., 2006). Já a haloclastia, intensificada pela evaporação de sais em períodos secos, atua na desagregação mecânica dos minerais, especialmente feldspatos e biotita (Miller, 1970; Motti & Bonanomi, 2018).

O intemperismo químico ocorre via hidrólise e oxidação mineral, sendo favorecido por microambientes úmidos e protegidos (Vidal Romaní, 2000). Adicionalmente, organismos como líquens e cianobactérias contribuem para a biocorrosão, formando crostas que retêm umidade e promovem alteração mineral (Viles & Gorbushina, 2003; Ascaso et al., 2002).

A interação desses processos gera formas como cavidades, canaletas e padrões alveolares, com desenvolvimento controlado por fraturas, estrutura mineralógica e orientação solar (Dragovich, 1993). O estudo dessas feições auxilia na reconstrução de paleoclimas e na avaliação de áreas com valor geocientífico (Brilha, 2016; Reynard et al., 2007).

TAFONIZAÇÃO E HONEYCOMBS

A **tafonização** é um intemperismo diferencial que forma cavidades hemisféricas (tafoni) ou padrões alveolares (honeycombs), comuns em granitos de regiões áridas (Mustoe, 1982; Turkington & Paradise, 2005). No Lajedo de Pai Mateus, essas feições predominam em blocos voltados para oeste-sudoeste, refletindo influência solar e microclimática (Dragovich, 1993).

A formação dos tafoni começa com pequenas depressões estruturais que retêm umidade, facilitando a ação biológica e química (Ascaso et al., 2002). A haloclastia e a expansão térmica promovem a desagregação progressiva da rocha (McCarroll & Nesje, 1996). Estruturas internas como microfraturas e granulação fina também condicionam o desenvolvimento das feições (Twidale & Vidal Romaní, 2005).

As cavidades do Lajedo apresentam entre 5 e 25 cm de profundidade, podendo ultrapassar 50 cm de diâmetro, compatíveis com registros globais (Matsuoka, 2001). Essas morfologias refletem a interação complexa entre mineralogia, estrutura e clima.

A tafonização também apresenta uma dimensão temporal significativa, pois as feições observadas representam etapas avançadas de um processo que pode durar séculos ou milênios. Estudos de datação cosmogênica em outros afloramentos



graníticos sugerem que os tafoni podem começar a se formar poucos milhares de anos após a exumação da rocha, especialmente em climas com alternância marcada entre umidade e aridez (Andre et al., 1997).

Assim, a tafonização no Lajedo de Pai Mateus representa não apenas um processo geomorfológico ativo, mas também um registro paleoclimático e paleoambiental valioso, cuja leitura pode revelar mudanças nas condições microambientais ao longo do tempo. A compreensão dos condicionantes geomorfológicos, mineralógicos e ecológicos que influenciam essa dinâmica é essencial para a análise integrada da paisagem granítica semiárida e para a conservação de seu patrimônio geológico singular.

RESULTADOS E DISCUSSÃO



FIGURA 1– Bloco granítico em cúpula, situado na porção mais elevada do inselberg. Tafonis hemisféricos em diferentes estágios de desenvolvimento, concentrados na porção nordeste, indicam atuação diferenciada de processos térmicos e higroscópicos. A coalescência parcial entre cavidades revela avanço de um estágio juvenil para maduro, segundo tipologia de Vergès-Belmin (2008). A sombra projetada sugere aprofundamento das cavidades de forma assimétrica, indicando controle estrutural local.

A primeira figura apresenta um bloco granítico em cúpula, localizado na porção mais elevada do inselberg. A presença de tafonis hemisféricos concentrados na face nordeste indica a influência da orientação solar vespertina, que acentua os ciclos de aquecimento e resfriamento, favorecendo a termoclastia e a haloclastia. A coalescência parcial entre cavidades sugere um estágio intermediário de desenvolvimento, de juvenil para maduro, conforme a tipologia proposta por Vergès-Belmin (2008). A assimetria das cavidades, evidenciada pela sombra projetada, sugere controle estrutural, possivelmente por fraturas subjacentes ou variação litológica local.



FIGURA 2– Tafonis do tipo ‘honeycomb’ (favo de mel), com orientação definida por planos subverticais de fratura. Cavidades interligadas lateralmente, possivelmente iniciadas por microfissuras expandidas por cristoclastia. Há indícios de salificação nas bordas, que aceleram a disgregação mecanoquímica, padrão típico de microambientes semiáridos com umidade estacional.

Na segunda imagem, observa-se um padrão típico de honeycomb, com cavidades interconectadas e alinhadas segundo planos subverticais de fratura. Essas estruturas indicam que a cristoclastia, processo de fragmentação induzido por cristalização de sais desempenha papel relevante na expansão de microfissuras, especialmente em ambientes semiáridos com alternância de umidade sazonal. As bordas das cavidades apresentam indícios de salificação, caracterizada por crostas esbranquiçadas, o que reforça a hipótese de disgregação mecanoquímica em microambientes confinados.



FIGURA 3 – Bloco subesférico com tafoni hemisférico de aproximadamente 1,2 m de largura. A uniformidade das bordas indica atuação prolongada de processos de dissolução lenta. Crostas de óxidos visíveis internamente sugerem mobilização de ferro e manganês. Cavidade apresenta zona de escorrimento em sua base.



A terceira figura destaca um bloco subsférico com tafoni isolado, de aproximadamente 1,2 metros de largura. A regularidade das bordas e a presença de crostas de óxidos internamente sugerem atuação prolongada de processos de dissolução lenta e mobilização de elementos como ferro e manganês, típicos do intemperismo químico sob influência de umidade estacional. A zona de escorrimento observada na base da cavidade reforça a ideia de retenção hídrica localizada, o que favorece a alteração mineralógica e a formação de halos de coloração diferenciada.

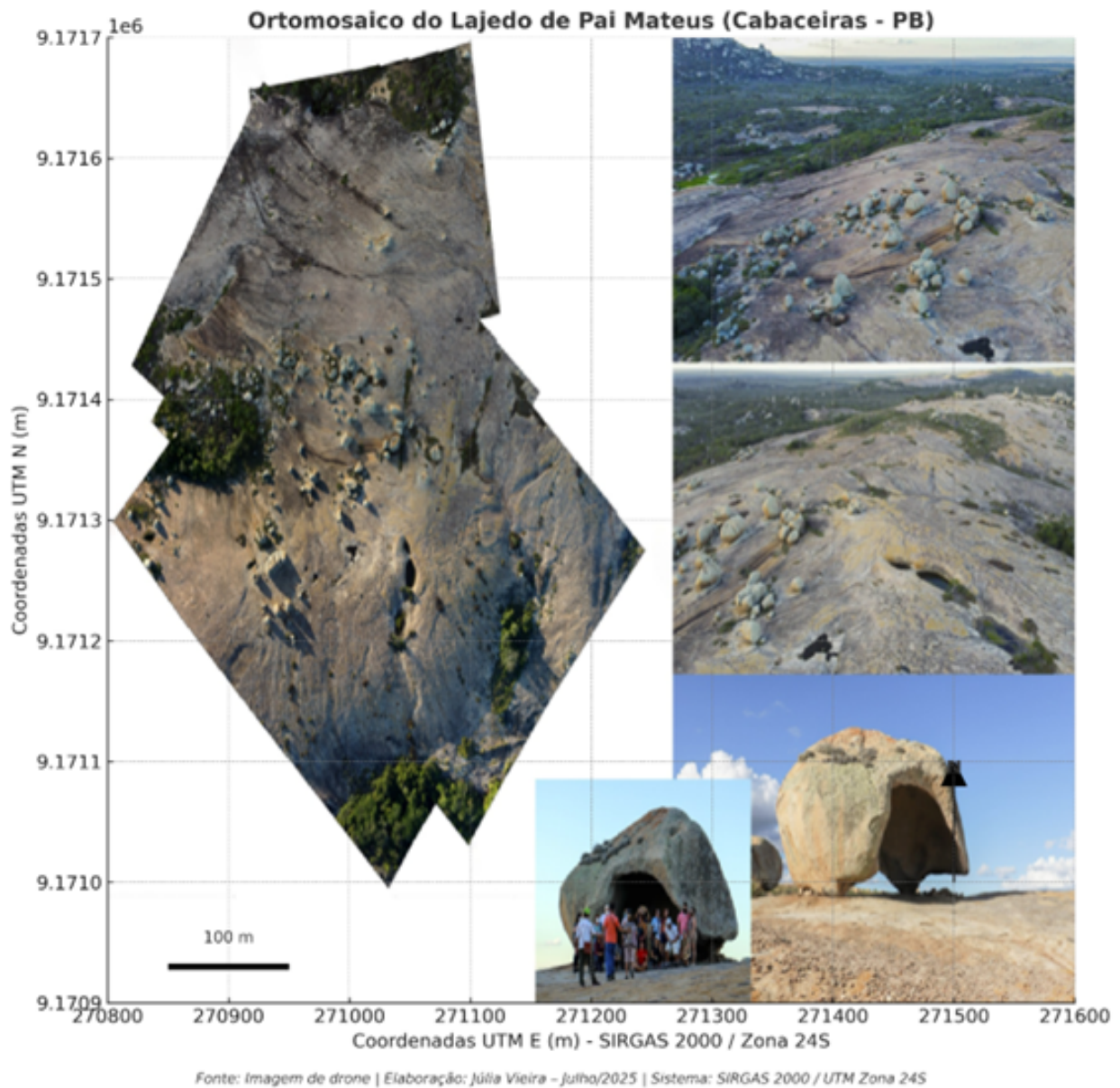


FIGURA 4 – Mosaico panorâmico evidenciando a distribuição heterogênea das feições tafônicas e blocos soltos. Padrão de dispersão sugere intensa dissecação de superfície granítica. Feições concentradas em declividades médias (15–30°), com maior densidade nas áreas voltadas a NE e N.



O mosaico panorâmico da quarta imagem permite visualizar a distribuição espacial heterogênea das feições tafônicas. As cavidades se concentram em declividades médias, entre 15° e 30°, sugerindo que o escoamento superficial difuso e a exposição solar controlam a localização dos processos de meteorização. A maior densidade de tafoni nas faces voltadas para o nordeste e norte pode ser explicada pela incidência solar matinal mais intensa, que contribui para a variação térmica e a evaporação de umidade acumulada durante a noite.



FIGURA 5 – Grupo de blocos arredondados na interface entre lajedo exposto e vegetação. Tafonis pouco desenvolvidos, indicando estágio incipiente de meteorização. A presença de biocostras e manchas biológicas sugere influência de líquens e microrganismos na nucleação das cavidades.

A quinta imagem mostra um grupo de blocos na transição entre o lajedo exposto e a vegetação arbustiva. Os tafonis pouco desenvolvidos indicam estágio inicial de intemperismo, com cavidades rasas e de pequeno diâmetro. A presença de biocostras e manchas escuras nas superfícies aponta para a atuação de organismos litobiontes, como líquens, que promovem a biocorrosão inicial da rocha e podem atuar como núcleos de nucleação das cavidades.



FIGURA 6 – Bloco isolado com contorno oblato e presença de cactáceas. Ausência de tafonis visíveis pode estar associada à menor inclinação e posição mais baixa no relevo. Estabilidade estrutural sugere baixa densidade de fraturas.

Na sexta figura, observa-se um bloco oblato, isolado, com cactáceas em sua superfície. A ausência de tafonis visíveis pode estar relacionada à menor inclinação do bloco, o que reduz a exposição ao escoamento superficial, e à posição mais baixa no relevo, onde a estabilidade microclimática pode inibir os ciclos intensos de variação térmica. A densidade reduzida de fraturas também parece contribuir para a menor taxa de meteorização.



FIGURA 7 – Visão aérea de cluster de blocos com esfoliação esferoidal. Tafonis lineares nas faces voltadas ao sul indicam que a retenção hídrica pode favorecer processos químicos. Agrupamento em fileiras sugere fraturamento ortogonal pré-existente.



Por fim, a imagem aérea do conjunto de blocos evidencia a ocorrência de esfoliação esferoidal e alinhamentos de cavidades nas faces voltadas ao sul. Esse padrão linear pode ser interpretado como resultado da atuação de fraturamentos ortogonais pré-existentes, que direcionam o escoamento hídrico e a penetração de soluções químicas, favorecendo a formação de tafoni alongados. A disposição dos blocos em fileiras reforça a hipótese de condicionamento estrutural na gênese das feições tafonizadas.

A análise das feições tafonizadas no Lajedo de Pai Mateus foi acompanhada por registro fotográfico sistemático, permitindo a interpretação detalhada de padrões morfológicos, distribuição espacial e condicionantes ambientais. As imagens captadas revelam uma diversidade de formas e estágios evolutivos que refletem a atuação integrada de processos físicos, químicos e biológicos sob controle estrutural local.

Essas observações em campo, articuladas com a bibliografia especializada, confirmam que a tafonização no Lajedo de Pai Mateus resulta de uma combinação complexa de fatores ambientais, estruturais e litológicos. A análise detalhada das imagens amplia a compreensão dos microprocessos envolvidos e reforça a importância do registro visual sistemático em estudos geomorfológicos de alta resolução.

LAJEDO DO PAI MATEUS: GEODIVERSIDADE, GEOPATRIMÔNIO E TURISMO DE NATUREZA NO SEMIÁRIDO PARAIBANO

O Lajedo do Pai Mateus constitui como uma das formações graníticas mais emblemáticas do semiárido brasileiro. Inserido no contexto geológico do Pluton Bravo, o sítio representa uma notável expressão da geodiversidade, destacando-se tanto pelas suas feições peculiares quanto pela relevância científica, estética e turística que carrega.

Ageodiversidade do lajedo do paimateus manifesta-se na variedade geomorfológica associada aos granitos, como os dorsos de baleia (*whaleback*), formações acasteladas (*tors*), matações (*boulders*) e diversas feições, como as gnammas, tafoni e formas de dissolução diferenciadas, que configuram uma paisagem de claro valor estético e científico, como destaca Souza (2022). A diversidade abiótica, formada ao longo de milhões de anos, resulta da exposição e do intemperismo de corpos magmáticos profundos, que foram sendo esculpidos por processos exógenos em condições climáticas semiáridas, mas associadas à paleoclimas (MAIA & NASCIMENTO, 2018).

No caso específico do Lajedo de Pai Mateus, as rochas ocorrem de maneira tabular e horizontalizada, com destaque para dezenas de grandes blocos arredondados dispostos aparentemente de forma aleatória sobre uma superfície lajedada, cujo aspecto visual impressiona visitantes e pesquisadores. O local representa um



significativo geopatrimônio, ou seja, um bem natural de valor não apenas geológico ou geomorfológico, mas também cultural, educativo e turístico.

No âmbito da geomorfologia, o Lajedo do Pai Mateus foi classificado como um geomorfossítio com alto valor estético e intrínseco, conforme aponta Souza (2024). A paisagem geomorfológica combina rara integridade das feições com elevado contraste cromático, verticalidade e forte apelo cênico, aspectos que o tornam não apenas um objeto de estudo acadêmico, mas também um atrativo natural de interesse nacional e internacional.

A relevância geomorfológica e patrimonial reforça a necessidade de ações efetivas de geoconservação, ainda que a região esteja inserida em uma Área de Proteção Ambiental (APA Cariri Paraibano), os esforços de conservação têm se concentrado em aspectos geológicos, relegando a geomorfologia a um papel secundário. A intensificação do turismo na área, sem um planejamento adequado, pode provocar impactos negativos à integridade das formações, como pisoteamento, lixo e degradação visual. Isso justifica a urgência de estratégias de manejo baseadas na conservação ativa do patrimônio geomorfológico.

No que se refere ao turismo de natureza, o Lajedo do Pai Mateus já se consolidou como um dos principais atrativos do Estado da Paraíba. Suas paisagens têm sido amplamente exploradas em produções cinematográficas, fotográficas e promocionais do turismo regional. A visitação constante ao local, com a presença de grupos de turistas, guias locais e diversos esforços para melhoramento da infraestrutura no entorno, revelam o potencial local. No entanto, para que esse potencial seja plenamente alcançado, é fundamental que o turismo esteja alinhado aos princípios da geoconservação, garantindo a integridade dos elementos naturais a longo prazo.

O Lajedo do Pai Mateus é, portanto, um exemplo de como a geodiversidade pode ser compreendida, valorizada e preservada a partir de uma abordagem integrada entre ciência, cultura e sustentabilidade. Seu reconhecimento como geopatrimônio, aliado ao seu potencial turístico, reforça a importância do aperfeiçoamento de políticas públicas voltadas à conservação dos elementos abióticos da natureza, especialmente em contextos semiáridos como no Cariri Paraibano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da tafonização e das estruturas do tipo *honeycomb* no Lajedo de Pai Mateus evidencia a complexidade dos processos geomorfológicos em ambientes graníticos inseridos em contextos semiáridos. A partir da análise das características morfológicas, mineralógicas e estruturais das feições tafonizadas, foi possível compreender que sua formação resulta da interação sinérgica entre fatores físicos,



químicos e biológicos, condicionados por aspectos microambientais específicos como orientação solar, rugosidade da superfície e estrutura litológica.

As evidências reunidas ao longo da pesquisa indicam que os tafoni constituem não apenas expressões morfológicas marcantes, mas também registros ambientais de grande relevância científica. Esses elementos funcionam como indicadores sensíveis de processos de intemperismo e podem ser utilizados para inferências paleoambientais, auxiliando na reconstituição da história evolutiva da paisagem sertaneja.

O Lajedo de Pai Mateus, com sua notável concentração de feições tafonizadas, se destaca como um verdadeiro laboratório natural para a análise de dinâmicas geomorfológicas em granitos expostos. A importância científica do sítio é acrescida por seu valor cultural, paisagístico e geoturístico, o que reforça a necessidade de medidas integradas de conservação e manejo do patrimônio geológico. Políticas públicas voltadas à valorização da geodiversidade regional, aliadas a práticas de turismo sustentável, podem contribuir para a proteção dessas formas frágeis frente à intensificação de impactos antrópicos.

Em termos metodológicos, o presente trabalho demonstrou a importância da observação de campo detalhada, do uso de referências bibliográficas consolidadas e da articulação entre diferentes escalas analíticas — do micro ao macro. A continuidade das investigações poderá incorporar técnicas laboratoriais, como análise de mineralogia por difração de raios-X, mapeamento 3D de cavidades e datação cosmogênica, a fim de aprofundar o conhecimento sobre os tempos de exposição das rochas e a velocidade dos processos tafonizantes.

Conclui-se que os tafoni do Lajedo de Pai Mateus constituem uma das manifestações mais emblemáticas da atuação dos processos de intemperismo em rochas cristalinas sob regime semiárido. Seu estudo contribui não apenas para o avanço da geomorfologia regional, mas também para a valorização científica e educativa do semiárido nordestino como espaço dinâmico, diverso e geologicamente significativo.

O Lajedo do Pai Mateus reúne valores científicos, estéticos, culturais e turísticos que o qualificam como relevante geopatrimônio. Suas feições graníticas singulares e paisagens de forte apelo visual evidenciam a necessidade de estratégias efetivas de geoconservação, especialmente diante da crescente atividade turística. Assim, a conservação do local não deve se limitar à proteção geológica, mas integrar ações que valorizem a geomorfologia, promovam o geoturismo responsável e assegurem a geoconservação desse patrimônio natural único.



Agradecimentos:

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudos, e ao Grupo de Estudos Geomorfológicos e Hidroecológicos de Ambientes Tropicais (GEGHAT) pelo suporte acadêmico durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRE, M. F. et al. **Granite weathering in cold climates**: Geomorphic evidence from the Arctic, subarctic and alpine regions. *Geomorphology*, v. 21, n. 1, p. 3–19, 1997.
- ASCASO, C. et al. **In situ transmission electron microscopy study of endolithic microorganisms in dolomite rock from Antarctica**: Implications for the search for life on Mars. *International Microbiology*, v. 5, n. 4, p. 153–158, 2002.
- BRILHA, J. **Patrimônio geológico e geoconservação: fundamentos e práticas**. 2. ed. São Paulo: Beca, 2016.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Geossítios do Brasil: Inventário e Avaliação**. Rio de Janeiro: CPRM, 2015.
- DRAGOVICH, D. A. **Tafoni and cave development on granitic rocks in Australia**. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 37, n. 3, p. 289–305, 1993.
- FITZGERALD, P. G. et al. **Control of exfoliation on rock fracturing and bedrock channel incision**. *Geology*, v. 34, n. 4, p. 265–268, 2006.
- LIMA FILHO, M. F. et al. **Geologia e geomorfologia da região do Lajedo de Pai Mateus, Paraíba**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 1, p. 53–61, 2005.
- MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. **Relevos Graníticos do Nordeste brasileiro**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 2, p. 373–389, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1295>>;
- MATSUOKA, N. **Weathering forms**. *Geomorphology*, v. 41, p. 33–52, 2001.
- MCCARROLL, D. **Rock weathering and soil formation in the semi-arid environment**. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 16, n. 1, p. 15–26, 1991.
- MCCARROLL, D.; NESJE, A. **Rock surface weathering as an indicator of exposure age**: a discussion. *Quaternary Science Reviews*, v. 15, n. 8, p. 967–976, 1996.
- MILLER, D. J. **Tafoni on granitic rocks**: their occurrence and genesis. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 14, n. 2, p. 173–193, 1970.
- MOTTI, R.; BONANOMI, C. **Tafoni development and microclimatic effects on coastal granites**. *Geomorphology*, v. 301, p. 189–199, 2018.
- NEWSOME, D.; MOORE, S. A.; DOWLING, R. K. **Natural Area Tourism: Ecology, Impacts and Management**. 2. ed. Bristol: Channel View Publications, 2013.



- OLIVEIRA, R. S. de et al. **Tafoni and weathering processes in granitic landscapes of Paraíba: a comparative analysis.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 99, p. 102573, 2020.
- REYNARD, E.; BRILHA, J.; GRANGÉ, A. **Assessment of geosite fragility: a methodological proposal.** *Geoheritage*, v. 1, n. 3, p. 139–145, 2007.
- SILVA, R. S.; BRILHA, J. **Monitoring geosites under visitor pressure: a case study from Brazil.** *Geoheritage*, v. 11, p. 1249–1260, 2019.
- SOUZA, N. R. L. **Patrimônio Geomorfológico do Pluton Bravo no Semiárido paraibano: bases para a Geoconservação.** Dissertação (Mestrado em Geografia) –Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022;
- SOUZA, N. R. L. de, XAVIER, R. A.; BORGES NETO, I. O. **Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico do Plúton Bravo no semiárido paraibano.** *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 25 (1), 2024; Disponível em: <<https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2460>> Acesso em: 04 jul. 2025;
- TWIDALE, C. R.; VIDAL ROMANÍ, J. R. **Landforms and Geology of Granite Terrains.** London: Taylor & Francis, 2005.
- VIDAL ROMANÍ, J. R. **Tafoni formation in granitic rocks: a review.** *Geomorphology*, v. 35, n. 1–2, p. 89–108, 2000.
- VILES, H. A.; GORBUSHINA, A. A. **Microbial weathering of rocks.** In: *Geomicrobiology: Molecular and Environmental Perspective*. Springer, 2003. p. 289–315.
- VERGÈS-BELMIN, V. **Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns.** Paris: ICOMOS, 2008.



ERODIBILIDADE DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAPAMA-PE*

*Trabalho financiado com recursos da
CAPES (código de financiamento 001)
através do edital UFPE 06/2022

Cristiane Barbosa da Silva **1**

José Coelho de Araújo Filho **2**

Deyse Ferreira da Silva **3**

Marcelo Ricardo Bezerra de Miranda **4**

Oswaldo Girão da Silva **5**

Paulo Lucas Cândido de Farias **6**

PALAVRAS-CHAVE: suscetibilidade erosiva; erosão de solos; uso da terra;
Bacia Hidrográfica do rio Pirapama-PE.

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE (BHRP-PE) sofreu o desmatamento de sua cobertura vegetal original de Mata Atlântica para dar lugar ao monocultivo da cana-de-açúcar na segunda metade do século XVI. Posteriormente, já no século XX, o seu uso foi diversificado com a implantação de assentamentos promovidos pelo INCRA na BHRP, com a construção do porto de SUAPE, fora do perímetro da BHRP, mas que refletiu na expansão da urbanização nos municípios que compõem a área de estudo. A construção dos reservatórios Sicupema, Gurjaú e Pirapama, responsáveis pelo abastecimento de mais de 1/3 da população da Região Metropolitana do Recife-RMR, pressupõe manejo que respeite as limitações das áreas contribuintes dos respectivos reservatórios. Além disso, as mudanças de uso da terra não foram embasadas em estudos que explicassem a suscetibilidade natural dos solos aos processos erosivos. Desse modo, a determinação da erodibilidade dos solos levou em consideração os dados analíticos de 31 perfis de solos. Os parâmetros considerados foram: granulometria, estrutura, permeabilidade, teor de matéria orgânica do solo e diâmetro médio ponderado das partículas do solo. Os resultados demonstraram uma variabilidade de erodibilidade em função da diversidade de classes de solos. Nos Latossolos Amarelos, a erodibilidade foi caracterizada como muito baixa com valores $0,01 < t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$ numa área de 16,06 km² (2,66%). Para os Argissolos Amarelos que ocupam 448,06 km² (77,17%), a erodibilidade foi diversificada em função dos solos desta classe serem heterogêneos em relação aos Latossolos. Dentre eles, ocorrem Argissolos Amarelos classificadas como muita alta

1 Doutoranda do Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, cristianebarbosa2@yahoo.com.br

2 Pesquisador doutor da EMBRAPA SOLOS -UEP Recife, coelhoembrapa@gmail.com

3 Mestre em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, silvadeyseferreira@gmail.com

4 Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, marcelomiranda@recife.ifpe.edu.br

5 Professor orientador: doutor, Programa de Pós-Graduação em Geografia - UFPE, osgirao@gmail.com

6 Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, paulo.farias@ifto.edu.br



erodibilidade ($K > 0,04 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) que ocupa $30,12 \text{ km}^2$ (4,98%); outros foram diferenciados com erodibilidade moderada ($0,02 > K < 0,03 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) distribuídos em $57,73 \text{ km}^2$ (9,56%). Por outro lado, ocorrem ambientes com Argissolos Amarelos que foram considerados com muito baixa erodibilidade ($0,01 < \text{t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$). Os Argissolos Vermelhos ocupam $22,07 \text{ km}^2$ (6,65%) e sua erodibilidade foi de $0,022 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, classificada como moderada. Os Argissolos Vermelho-Amarelos ocupam $203,69 \text{ km}^2$ (33,72%) e estão distribuídos em cinco ambientes distintos. Neste sentido, os Argissolos Vermelho-Amarelos em relevo suave ondulado, forte ondulado, forte ondulado com bolders e forte ondulado com caráter coeso possuem erodibilidade muito baixa ($0,01 < \text{t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$). Em contrapartida, os Argissolos Vermelho-Amarelos em relevo ondulado têm erodibilidade moderada ($0,020 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$). A erodibilidade dos Cambissolos apresentou valor de $0,028 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, classificada como moderada. Os Espodosolos ocupam $4,09 \text{ km}^2$ (0,67%) da BHRP e apresentaram valores de erodibilidade inferior a $0,01 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}.$ Os Gleissolos ocupam $48,07 \text{ km}^2$ (7,96%) e possuem erodibilidade variando entre $0,008$ e $0,049 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}$. Enquanto os Nitossolos ocupam uma área de $4,45 \text{ km}^2$ (0,74%) da área total e possuem erodibilidade com valores inferiores a $0,01 \text{ t.ha.h/ha.MJ}^{-1}$. Os valores de erodibilidade dos solos classificados como muito baixo pode ser explicado pela adição de vinhaça no monocultivo. Essa prática de correção do solo aumenta os teores de matéria orgânica e melhora a porosidade do solo. Uma outra questão a ser observada na classificação da erodibilidade é o papel da cobertura vegetal na proteção dos solos. Pois, os solos que tiveram baixa erodibilidade apresentam comportamento erosivo diferente quando removido a cobertura vegetal.

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do rio Pirapama-PE (BHRP-PE) sofreu o desmatamento de sua cobertura vegetal original de Mata Atlântica para dar lugar ao monocultivo da cana-de-açúcar na a partir da segunda metade do século XVI. Posteriormente, já no século XX, o seu uso foi diversificado com a implantação de assentamentos promovidos pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA e com a influência da construção do porto de SUAPE, fora do perímetro da BHRP, mas que refletiu na expansão da urbanização nos municípios que compõe a área de estudo. A construção dos reservatórios Sicupema, Gurjaú e Pirapama, responsáveis pelo abastecimento de mais de 1/3 da população da Região Metropolitana do Recife -RMR, pressupõe manejo que respeite as limitações das áreas contribuintes dos respectivos reservatórios. Além disso, as mudanças de uso da terra não foram embasadas em estudos que explicassem a suscetibilidade natural dos solos aos processos erosivos.

A erodibilidade do solo representa a suscetibilidade natural do solo aos processos erosivos. Portanto, é um parâmetro que está diretamente associado à classe de solo (Wischmeier; Smith, 1978; Araújo *et al.*, 2011; Brady; Weil, 2013; Silva, 2016; Shi *et al.*, 2021). Sendo assim, identificar a erodibilidade do solo para ambientes rurais implica



detectar os condicionantes naturais da maior suscetibilidade erosiva e pode subsidiar medidas que reduzam o impacto do uso intensivo da terra (Bertoni; Lombardi Neto, 1990; François, *et al.*, 2024).

A espacialização do fator erodibilidade é feita considerando diferentes recortes. Alguns autores consideram a bacia hidrográfica (Duarte *et al.*, 2020; Lense *et al.*, 2021; Miguel *et al.*, 2021; Wang; Zang, 2021; Zanchin *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Sooryamol *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2024), outros usam a divisão territorial municipal (Brito *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2021; Hassane *et al.*, 2023; François, *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024), estadual (Mannigel *et al.*, 2002; Castro *et al.*, 2011; Rosa *et al.*, 2022; Back, 2023; Francisco *et al.*, 2023), país (Godoi *et al.*, 2021) ou comparam solos característicos de países distintos (Denardin, 1990; Panagos *et al.*, 2014; Gupta *et al.*, 2024). Existem pesquisadores que consideram os padrões de relevo para espacializar a erodibilidade de acordo com a posição do solo na paisagem (Thomaz; Fidalski, 2020; Wang *et al.*, 2021; Santos; Silva Filho, 2023), ou até mesmo aqueles que trabalham na perspectiva da parcela (Wischmeier; Smith, 1978; Bertol *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2009; Souza, 2023) para encontrar valor padrão para cada classe de solo.

Independente da escala espacial adotada, o ideal é calcular a erodibilidade para cada classe de solo. No entanto, nem sempre é possível, em função da falta de levantamento pedológico em escala de detalhe. Por ser dependente da classe de solo, a erodibilidade influencia a infiltração, a desagregação das partículas pela ação da chuva e no transporte através do escoamento superficial. Conseqüentemente, tem atuação direta nos processos erosivos. Dentre os fatores com maiores influências na erodibilidade destacam-se a textura e o clima (Santos; Silva Filho, 2023).

A textura do solo refere-se ao tamanho e a proporção das partículas (silte, areia e argila) que compõem a parte sólida do solo. Essas frações sólidas estão organizadas entre si através de forças coesivas. Desse modo, quanto maior for essa resistência menor tende a ser a erodibilidade (Brady; Weil, 2013). Por outro lado, a ação do clima, notadamente a precipitação, atua para reduzir a força cisalhante das partículas do solo (Wischmeier, 1976, 1978). Nessa perspectiva, solos com arranjos texturais distintos, submetidos as mesmas condições climáticas, respondem diferentemente a erodibilidade. Por isso, é necessário avaliar a erodibilidade dos solos (Wang *et al.*, 2021).

Existem várias metodologias para prever a erodibilidade dos solos ou suscetibilidade erosiva (Wischmeier, 1976, 1978; Williams *et al.*, 1990; Zhu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021). Neste sentido, a erodibilidade pode ser determinada em campo, através de métodos diretos, que utilizem chuva natural ou artificial para identificar a



quantidade de material erodido e transportado (por evento chuvoso) para cada classe de solo (Bertoni; Lombardi Neto, 1999; Oliveira *et al.*, 2024).

Uma outra possibilidade de determinar a erodibilidade é através de métodos indiretos com a utilização de equações matemáticas. Nesta perspectiva, Wischmeier e Smith (1978) destacaram que a utilização da análise de regressão linear simples, entre as variáveis chuva natural e chuva simulada, pode contribuir para esse entendimento. Esse procedimento é utilizado com o intuito de mensurar o impacto da gota da chuva no processo erosivo (Xu *et al.*, 2021). Outros pesquisadores, a exemplo de Duarte *et al.* (2020), destacam equações que usam os atributos do solo para prever a erodibilidade. Enquanto Eduardo *et al.* (2013) defendem a utilização do nomograma de Wischmeier e Smith (1978). Neste último caso usa-se a combinação da textura, estrutura e permeabilidade com a porcentagem da matéria orgânica do solo.

Para Manningel *et al.* (2002), o método indireto que utiliza dados granulométricos para determinar a erodibilidade (k), por meio da equação $K = (\% \text{areia} + \% \text{silte}) / (\% \text{argila}) / 100$, é um método que pode ser aplicado para solos com textura intermediária. No entanto, para solos com textura extremamente argilosa e arenosa, os autores reconhecem que o método não é tão eficiente. Onde os valores reduzidos do fator K , para os solos argilosos, são ocasionados pela estrutura coesa que oferece maior resistência à erosão. Por outro lado, solos arenosos permitem uma melhor infiltração, o que também reduz o potencial erosivo (Almeida *et al.*, 2018).

Um outro modelo para determinação da erodibilidade por meio do método indireto é o nomograma de Wischmeier *et al.* (1971). Esse nomograma considera a determinação da estrutura, permeabilidade, teores de silte, areia muito fina, areia grossa e matéria orgânica como os parâmetros necessários para reconhecimento do fator K . Contudo, Denardin (1990) estudando a erodibilidade dos solos brasileiros e americanos chegou à conclusão de que o referido nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) não explicava adequadamente o comportamento dos solos brasileiros frente aos agentes intempéricos. Neste sentido, para contornar esse desafio Denardin (1990) propôs uma adaptação dos parâmetros que permitissem mensurar as respostas dos solos tropicais intensamente intemperizados.

Diante desse cenário, os intervalos de erodibilidade dos solos na literatura demonstram uma alta variabilidade de resultados entre as mesmas classes de solos (Denardin, 1990; Silva *et al.*, 2024) ou entre os mesmos tipos de horizontes diagnósticos (Manningel *et al.* 2002; Castro *et al.*, 2011; Duarte *et al.*, 2020; Lense *et al.*, 2021; Melo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024).



Em função da variabilidade dos resultados de erodibilidade existem, também, diferenças entre a quantidade de classes de propensão a erodibilidade e os pesos estabelecidos por cada pesquisador. Enquanto Bertoni e Lombardi Neto (1999) definiram 5 classes (Tab. 1), Castro *et al.* (2011) escolheram 6 classes de erodibilidade (Tab. 1). Esses autores discordaram ainda nos valores para cada intervalo.

TABELA 1 - Classificação do fator erodibilidade (K).

Classificação proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1999).		Classificação proposta por Castro et al. (2011).	
Propensão à erodibilidade	(t.ha.h/ha.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	Propensão à erodibilidade	(t.ha.h/ha.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
Muito baixa	$K < 0,01$	Muito baixa	$< 0,0090$
Baixa	$0,01 < K < 0,02$	Baixa	$0,0090-0,0150$
Moderada	$0,02 < K < 0,03$	Média	$0,0150-0,0300$
Alta	$0,03 < K < 0,04$	Alta	$0,0300-0,0450$
Muito alta	$K > 0,04$	Muito alta	$0,0450 - 0,0600$
-	-	Extremamente alta	$> 0,600$

FONTE: os autores (2025).

Um outro desafio enfrentado por pesquisadores que trabalham com a erodibilidade dos solos no Brasil é a combinação entre a extensão territorial do país, a diversidade de condicionantes ambientais e a baixa densidade de informações de perfis de solos disponíveis. Conseqüentemente, os dados pedológicos publicados têm 99,1% das unidades de mapeamento compostas por até 4 classes de solos (Coelho, *et al.*, 2024). Diante desse cenário, Coelho *et al.* (2024) chamaram atenção para a necessidade de classificar a erodibilidade das unidades de mapeamento pedológicos compostas considerando a proporcionalidade de cada componente da legenda ampliada do mapa de solos.

Diante desta conjuntura, o objetivo deste trabalho é determinar a erodibilidade dos solos da Bacia Hidrográfica do rio Pirapama – PE.

METODOLOGIA

A metodologia está dividida na localização da área de estudo e na descrição dos procedimentos adotados.

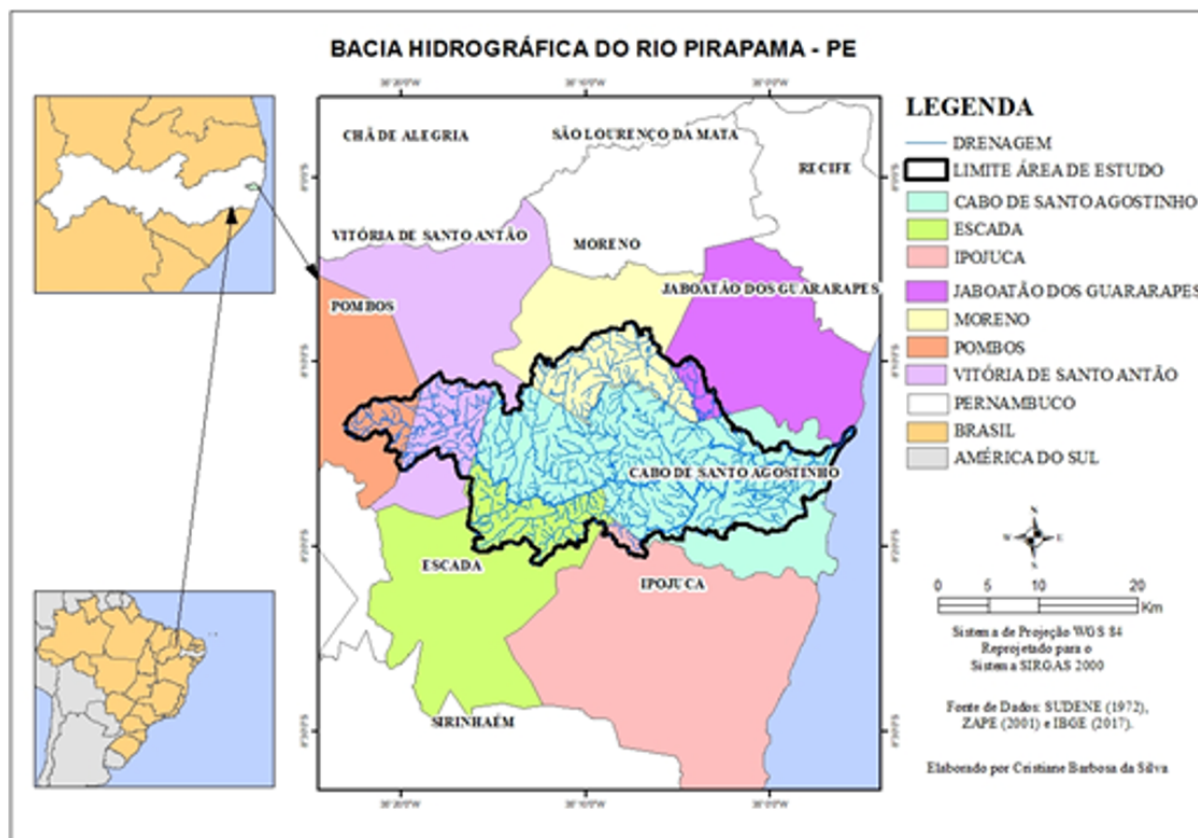
Localização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do rio Pirapama (BHRP) (Fig.1) está localizada dentro da Unidade de Planejamento Hídrico 04, que engloba o Grupo dos Pequenos Rios Litorâneos 2 (GL2) (APAC, 2020). Dentro da GL2 existem duas principais bacias hidrográficas: a do



rio Jaboatão e a do rio Pirapama. Essa última é objeto de estudo deste trabalho. A BHRP possui área de 604,20 km² inserida na Zona da Mata Pernambucana (Fig.1), englobando parte dos municípios de Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Escada, Vitória de Santo Antão, Pombos, Moreno e Jaboatão dos Guararapes (Silva, 2025).

FIGURA 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Pirapama - PE.



FONTE: Silva (2025).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O mapa de solos utilizado para este trabalho foi elaborado por Silva *et al.* (2025) abrangendo 23 unidades de mapeamento de solos. Três unidades são formadas por Latossolos Amarelos (LAd1, LAd2 e LAd3), separadas entre si devido a textura, a fase do relevo e presença de caráter coeso ou úmbrico; 12 unidades são constituídas pelos Argissolos diferenciadas entre si devido a cor, a textura, as fases ou algum caráter como elemento diferenciador. Neste sentido, os Argissolos foram agrupados em: Argissolos Amarelos (PAd1, PAd2 e PAd3), Argissolos Amarelos com caráter rúbrico (PAdr1, PAdr2 e PAdr3), Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA1, PVA2, PVA3, PVA4 e PVA5), Argissolos Vermelhos (PVD); uma unidade de Nitossolos (NVdf); nos ambientes de várzea foram delimitadas 04 unidades de mapeamento: com predomínio dos Cambissolos (CXbd), Gleissolos (GXbd1 e GXbd2) e Solos Indiscriminados de Mangue



(SM); ademais, no ambiente de restinga foram individualizadas duas unidades constituídas por Espodossolos (Ekgu e Eku).

A determinação da erodibilidade dos solos da BHRP levou em consideração os dados pedológicos oriundos dos perfis disponíveis na área de estudos (Brasil, 1973; Silva *et al.*, 2001; Araújo Filho *et al.*, 2000; Araújo Filho *et al.*, 2013) e dos perfis coletados e analisados por Silva (2025). Desse modo, a erodibilidade dos solos da BHRP foi determinada a partir dos dados analíticos de 31 perfis de solos. Os parâmetros considerados foram granulometria, estrutura, permeabilidade, teor de Matéria Orgânica do Solo (MOS), Diâmetro Médio Ponderado (DMP) das partículas do solo.

Os resultados das análises foram adicionados a equação proposta Denardin (1990) abaixo:

$$K = [(7,48 \times 10^{-6} M) + (4,48059 \times 10^{-3} P) - (6,31175 \times 10^{-2} DMP) + (1,039567 \times 10^{-2} R)]$$

Onde: K = fator de erodibilidade em t.ha.h/ha.MJ⁻¹.mm⁻¹; M (%) = [areia fina (%) + silte (%)] x {[areia fina (%) + de silte (%)] + areia grossa (%)}; P representa o valor da permeabilidade, que é estimado pela análise do perfil do solo até o topo do horizonte C. Sendo que para o resultado de P adotam-se os seguintes valores: P: 1 = muito lenta, 2 = lenta, 3 = lenta a moderada, 4 = moderada, 5 = moderada a rápida, 6 = rápida. Enquanto DMP corresponde ao Diâmetro Médio Ponderado das partículas do solo obtido da seguinte maneira:

$$DMP = \frac{(0,65 \times Ag\%) + (0,15 \times Af\%) + (0,0117 \times S\%) + (0,00024 \times Ar\%)}{100}$$

Onde Ag = areia grossa; Af = areia fina; S = silte; e Ar (argila);

$$R = \frac{TMO}{100}, \text{ sendo que TMO = teor de matéria orgânica do solo.}$$

Para calcular o teor de matéria orgânica foi considerado a quantidade de carbono orgânico do solo. Visto que o carbono orgânico corresponde a 58% do total da matéria orgânica. Neste sentido, o valor de carbono em cada horizonte foi multiplicado pelo fator 1,724 (Mielniczuk, 1999).

A extrapolação da informação do perfil de solo para o polígono de cada unidade de mapeamento de solos (Silva *et al.*, 2025) foi feita da seguinte forma: **a) para as unidades constituídas por uma única classe de solo** e com um único perfil representativo o dado do perfil representa o dado do polígono; e **b) para as unidades compostas por 2 ou mais componentes** a erodibilidade foi mensurada para cada classe de solo. Em seguida, a partir de uma média ponderada, conforme as proporções dos solos, foi definida o valor de erodibilidade para a unidade de mapeamento de solos composta.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

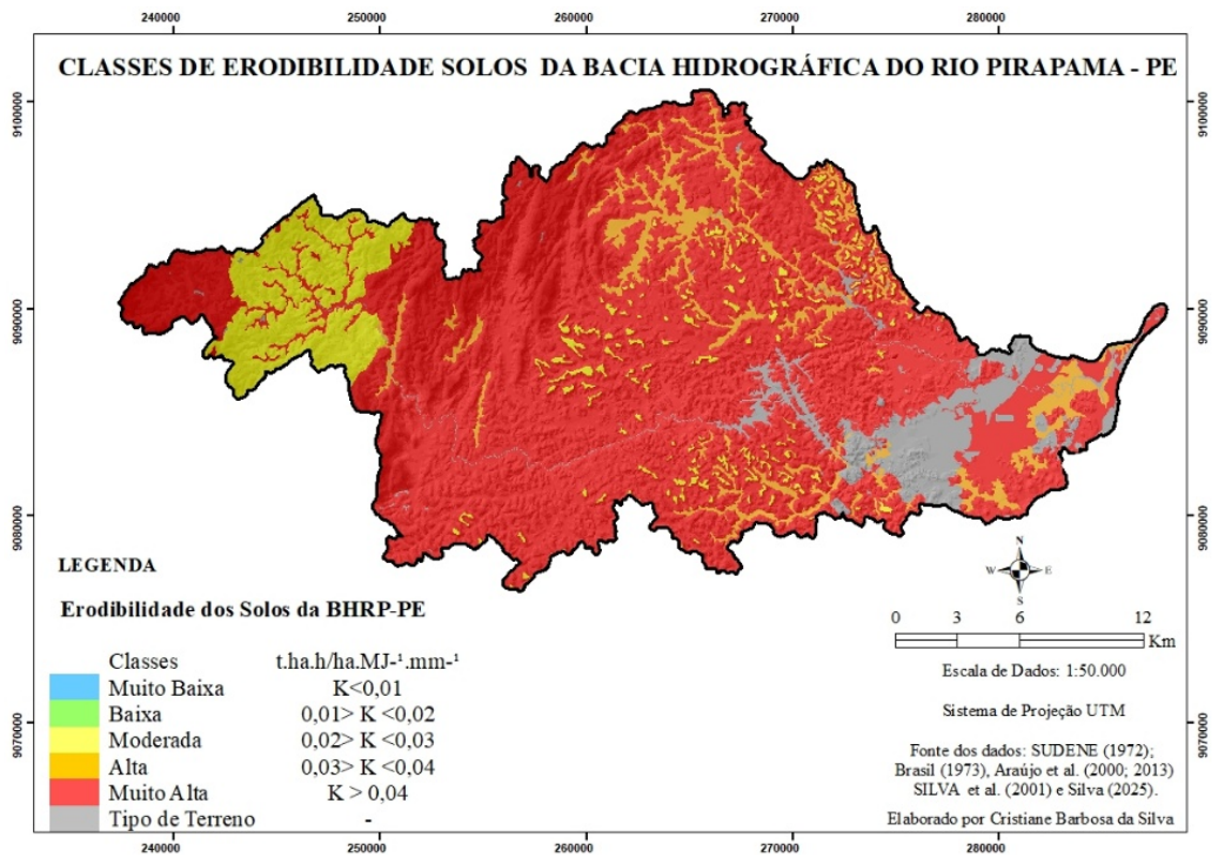
Os resultados demonstraram uma grande variabilidade de erodibilidade entre os horizontes superficiais e subsuperficiais de cada perfil de solo (Tabela 2). Para os horizontes superficiais a erodibilidade foi classificada como moderada ($0,03 < t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$) a muito alta ($0,04 t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$). Por outro lado, nos horizontes subsuperficiais o intervalo ficou entre baixa ($0,01 < t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$) a muito alta ($>0,04 t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$).

Nos solos mais evoluídos, Latossolos Amarelos (LAd1, LAd2 e LAd3), a erodibilidade foi caracterizada como moderada com $0,024 t.ha.h/ha.MJ^{-1}$ (Lad1) numa área de $11,73 km^2$ (1,94%) e concentrada na parte central do médio curso da BHRP. Além disso, no alto curso e nos divisores de água do perímetro da área de estudo (Fig. 2) os dados permitiram classificar a erodibilidade das unidades de mapeamento de solos LAd2 e LAd3 em muito alta erodibilidade com $0,064 t.ha.h/ha.MJ^{-1}$ (Tabela 17). Por outro lado, a literatura consultada demonstrou intervalos entre $0,002$ e $0,057 t.ha.h/ha.MJ^{-1}$ para os Latossolos (Denardin, 1990; Mannigel *et al.*, 2002; Silva, 2009; Castro *et al.*, 2011; Duarte *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024). Por isso, pode-se afirmar que os Latossolos da BHRP têm uma maior suscetibilidade erosiva do que aqueles consultados na literatura acima.

O grupo dos Argissolos (Tabela 2) ocupa $448,06 km^2$ (77,17%) de toda a BHRP. Dentre eles, existe a unidade PAd2 cuja erodibilidade pertence a classe moderada ($0,02 > K < 0,03 t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$) e está distribuída em $47,06 km^2$ (7,79%). A unidade PAd2 predomina no alto curso da BHRP entre os municípios Vitória de Santo Antão e Pombos. Em contrapartida, os demais Argissolos da área de estudo (Tabela 2), foram classificados com erodibilidade muita alta ($K > 0,04 t.ha.h/ha.MJ^{-1}.mm^{-1}$). Nota-se, no entanto, que neste estudo a erodibilidade dos Argissolos apresenta uma menor variabilidade espacial da erodibilidade em comparação com os dados da literatura. Visto que os trabalhos experimentais (Denardin, 1990; Souza *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024) e os trabalhos com dados estimados têm erodibilidade classificada entre os intervalos muito baixa a muito alta (Mannigel *et al.*, 2002; Duarte *et al.*, 2020; Lense *et al.*, 2021; Silva, 2022; Zanchin *et al.*, 2021). Portanto, devido a alta suscetibilidade erosiva dos diferentes Argissolos da BHRP é essencial utilizar práticas conservacionistas para garantir a manutenção da qualidade dos solos e reduzir o assoreamento dos diferentes corpos hídricos.



FIGURA 2 – Espacialização da erodibilidade dos solos da BHRP-PE.



FONTE: os autores (2025).

A erodibilidade dos Cambissolos apresentou valor de 0,049 t.ha.h/ha.MJ⁻¹.mm⁻¹ (Tabela 2), classificada como muito alta. Esse valor é superior ao valor observado por Melo *et al.* (2021) que classificou os Cambissolos de Águas Lindas/GO nos intervalos 0,013 e 0,024 t.ha.h/ha.MJ⁻¹.mm⁻¹. Os demais trabalhos consultados apresentaram valores de erodibilidade entre 0,024 até 0,059 t.ha.h/ha.MJ⁻¹.mm⁻¹ (Mannigel *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2009; Lense *et al.*, 2021). Neste sentido, no contexto dos Cambissolos a BHRP possui erodibilidade compatível com os intervalos observados na literatura consultadas sobre essa classe de solo.



FIGURA 2 – Unidades de mapeamento dos solos e suas classes de erodibilidade (K) na BHRP/PE

Unidade de mapeamento	Fator K t.ha.h/ha. MJ-1.mm ⁻¹			Área		Classe de erodibilidade*	Classe de Permeabilidade (horizonte superficial/horizonte subsuperficial)
	Horizonte superficial	Horizonte subsuperficial	Média Perfil	(km ²)	(%)		
PAa1	0,128	0,041	0,086	5,99	0,99	Muito Alta	Moderada/Lenta a Moderada
PAd1	0,095	0,055	0,075	3,73	0,62	Muito Alta	Moderada/Lenta
PAd2	0,038	0,008	0,023	47,06	7,79	Moderada	Moderada/ Lenta a Moderada
PAd3	0,128	0,041	0,169	24,13	3,99	Muito Alta	Moderada/Muito Lenta
PAdr1	0,069	0,124	0,097	10,67	1,77	Muito Alta	Moderada/Lenta
PAdr2	0,104	0,059	0,082	78,48	12,99	Muito Alta	Moderada/Lenta
PAdr3	0,083	0,039	0,061	52,24	8,65	Muito Alta	Moderada/Lenta
PVd	0,088	0,491	0,290	22,07	6,65	Muito Alta	Moderada/Lenta
PVAd1	0,086	0,03	0,058	3,01	0,50	Muito Alta	Moderada/Lenta
PVAd2	0,123	0,216	0,1695	46,14	7,64	Muito Alta	Moderada/Lenta
PVAd3	0,080	0,020	0,050	54,23	8,98	Muito Alta	Moderada/Lenta
PVAd4	0,111	0,044	0,077	86,75	14,36	Muito Alta	Moderada/Lenta
PVAd5	0,093	0,043	0,116	13,56	2,24	Muito Alta	Moderada/Lenta
CXbd	0,063	0,036	0,049	37,71	6,24	Muito Alta	Moderada/Muito Lenta
Ekgu	0,063	0,500	0,282	1,23	0,20	Muito Alta	Rápida/Lenta
Ekv	0,063	0,500	0,282	2,86	0,47	Muito Alta	Rápida/Lenta
GXbd1	0,037	0,490	0,264	36,53	6,05	Muito Alta	Muito baixa/Lenta
GXbd2	0,045	0,054	0,050	11,54	1,91	Muito Alta	Moderada/ Lenta a Moderada
LAd1	0,029	0,018	0,024	11,73	1,94	Muito Alta	Lenta/ Lenta
LAd2	0,088	0,040	0,064	2,47	0,41	Muito Alta	Moderada/ Lenta
LAd3	0,082	0,046	0,064	1,86	0,31	Muito Alta	Moderada/ Lenta a Moderada
NVdf	0,143	0,029	0,086	4,45	0,74	Muito Alta	Lenta/ Lenta
SM**	0,045	0,054	0,050	5,25	0,87	Moderada	Muito Lenta/ Muito Lenta

FONTE: os autores (2025).

* A classificação da erodibilidade dos solos de cada unidade de mapeamento levou em consideração o resultado dos dados do perfil de solo representativo. **SM a erodibilidade dessa unidade foi obtida a partir da média dos valores do resultado da unidade GXbd2. FONTE: os autores (2025).



Os Espodosolos da BHRP (EKu e EKgu) estão presentes em 4,09 km² (0,67%) da BHRP nos ambientes das restingas. Essas unidades de mapeamento apresentaram valores de erodibilidade 0,0282 t.ha.h/ha.MJ⁻¹mm⁻¹. Esse valor pode ser explicado pelo fato de que solos arenosos possuem uma menor estabilidade de agregados. Ademais, a erodibilidade das unidades EKu e EKgu está dentro do intervalo observado na literatura entre 0,189 até 0,5750 t.ha.h/ha.MJ⁻¹mm⁻¹ para a mesma classe de solo (Mannigel *et al.*, 2002; Duarte *et al.*, 2020).

Os Gleissolos ocupam 48,07 km² (7,96%) e apresentaram erodibilidade moderada (GXbd1) a muito alta (GXbd2), com valores entre 0,0264 e 0,050 t.ha.h/ha.MJ⁻¹mm⁻¹, respectivamente. Esses dados são inferiores aos observados por Oliveira *et al.* (2022) na bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu/SP. Por outro lado, a erodibilidade dos Gleissolos da BHRP é semelhante ao intervalo entre 0,0010 e 0,048 t.ha.h/ha.MJ⁻¹mm⁻¹ observados em outras pesquisas para a classe dos Gleissolos (Mannigel *et al.*, 2002; Duarte *et al.*, 2020; Lense *et al.*, 2021; Barbosa *et al.*, 2024).

A unidade de mapeamento que corresponde aos Nitossolos ocupa uma área de 4,45 km² (0,74%) da área total da BHRP. A erodibilidade dessa unidade foi classificada como muito alta com 0,086 t.ha.h/ha.MJ⁻¹mm⁻¹ (Tabela 2). Este valor é bem superior ao intervalo observado na literatura consultada que foi de 0,0027 até 0,0355 t.ha.h/ha.MJ⁻¹mm⁻¹ (Mannigel *et al.*, 2002; Bertol *et al.*, 2007; Castro *et al.*, 2011; Hennig; Mota, 2018; Graça; Silveira, 2020; Melo; Santos, 2020; Nunes, 2020; Decco, 2021; Lense *et al.*, 2021). Destaca-se que o resultado de alta erodibilidade para os Nitossolos foi mensurado sobre os usos: policultura, cana-de-açúcar e pomar abandonado. Onde todos esses usos oferecem uma proteção maior do que no ambiente de solo exposto. Por isso, é salutar enfatizar o aumento da suscetibilidade erosiva dos Nitossolos quando ocorre a conversão da agricultura para a expansão urbana. Pois, essa classe de solo tem sido utilizada, sobretudo, com o monocultivo de cana-de-açúcar desde o início do século XVI com a implantação desse sistema de exploração. Porém, recentemente, por volta de 2014 (Silva, 2025) parte da área do Nitossolo na BHRP foi convertida para loteamentos na área de expansão urbana do município do Cabo de Santo Agostinho e a resposta da paisagem local foi o surgimento de incisões erosivas do tipo voçoroca (Fig. 3A e Fig. 3B). Portanto, é uma classe de solo que requer um maior cuidado durante a conversão de áreas verdes para a expansão urbana.



FIGURA 3A – Voçorocamento na unidade NVdf no Cabo de Santo Agostinho – PE.



FONTE: Cristiane B. da Silva (2023).

FIGURA 3B – Voçorocamento na unidade NVdf no Cabo de Santo Agostinho – PE.



FONTE: Marcelo R. B. Miranda (2023).

Resultado semelhante foi observado por Londero (2019), no Rio Grande do Sul, quando estudou a erosão e o escoamento superficial em encostas com plantio direto sobre o Nitossolo. A autora destacou que a combinação do fator volume de chuva com baixa cobertura vegetal teve como consequência um grande volume de material transportado do horizonte superficial.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos com moderada erodibilidade foram observados nos topos dos interflúvios (LAd1), nas vertentes (PAd2), nas planícies fluviais do médio e baixo cursos (GXbd1). Por outro lado, nos demais interflúvios (PAal, PAd1, PAd3, PAdr1, PAdr2, PAdr3, PVd, PVAd1, PVAd2, PVAd3, PVAd4, PVAd5, e NVdf), nos topos (LAd2 e LAd3), nas planícies (CXbd e GXbd2) e no ambiente de restinga (Ekgu e Eku) os resultados permitiram classificar a erodibilidade em muito alta.

A Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE possui 82,75% do seu território com alta suscetibilidade natural aos processos erosivos. Esse cenário demanda um maior cuidado nas práticas de manejo para diminuir a produção de sedimentos nos interflúvios. Visto que a referida área, também, possui papel fundamental no fornecimento de água para o abastecimento de 1/3 da Região Metropolitana do Recife.

Dentre as classes de solos estudadas, o Nitossolo é aquela que apresenta maior suscetibilidade aos processos erosivos. Sobretudo, no momento da conversão de áreas agrícolas para áreas urbanizadas. Desse modo, é essencial que durante esse tipo de transformação espacial o solo fique exposto por um curto período de tempo. Pois, o custo para recuperar uma área degradada com voçorocamento é muito alto.

Diante da importância da BHRP para a Região Metropolitana do Recife é interessante o desenvolvimento de pesquisas futuras que mensurem o volume de material erodido para os eventos climáticos de maiores recorrências.

Agradecimentos:

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de doutorado da primeira autora, processo IBPG-0854-7.06/20 referente ao edital 20/2019; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo apoio financeiro para as análises físicas e químicas de solos através do Edital PROPG nº06/2022.



REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. X. P. **Determinação do fator de erodibilidade K de substratos de mineração revegetados no Distrito Federal**. 2018. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós – Graduação em Ciências Ambientais. Universidade de Brasília. Brasília/DF, 2018, 51p.
- APAC. **Atualização do plano estadual de recursos hídricos de Pernambuco – PERH/PE**. Nota técnica: unidades de planejamento. Recife, 2020, 29p. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1677605104_PERH_NT_Ups.pdf. Acessado em: 29/10/2024.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, L. A. R.; C.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C.; SOUZA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P. LIMA, P. C.; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. C. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco. **EMBRAPA SOLOS: Boletim Técnico**, nº 11. 2000, 382p.
- ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; NETO, M. R. H. Estimativa da Erodibilidade de Latossolos do Piauí. **Scientia Plena**, vol. 7, nº 10. 2011, p.1-6.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; BARBOSA NETO, M.V.; SILVA, C. B.; ARAÚJO, M. S. B.; MENEZES, J.B. Levantamento Semidetalhado dos Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Natuba, Pernambuco. In: **Revista Brasileira de Geografia Física** vol. 6, nº 3 (online), Recife: UFPE, 2013, pp. 384-397.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 686p. ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; NETO, M. R. H. Estimativa da Erodibilidade de Latossolos do Piauí. **Scientia Plena**, vol. 7, nº 10. 2011, p.1-6.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. **Boletim Técnico nº 26** v. 1 (Ministério da Agricultura). Recife: 1973. 418p.
- BACK, A. J.; Estimativa de perdas de solo por erosão hídrica: aplicação da Equação Universal de Perdas de Solos. **Boletim Técnico** nº 210. Florianópolis/SC: EPAGRI, 2023, 80p.
- BARBOSA, W.; GUERRA, A. J. T.; VALLADARES, G. S. Soil Erosion Modeling Using the Revised Universal Soil Loss Equation and a Geographic Information System in a Watershed in the Northeastern Brazilian Cerrado. In: **Geosciences**, 2024, vol. 14 (3), 78. P. 1-28.
- BERTOL, I.; LEITE, D.; ENGEL, F. L.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erodibilidade de um Nitossolo Háplico aluminoso determinada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 31. Viçosa/MG: SBCS, 2007, p. 541-549.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **conservação do solo**, 4ª ed. Campinas: Ícone, 1999. 355p.
- BLOISE, G. L. F.; CARVALHO JR, O. A.; REATTO, A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F. Avaliação da Suscetibilidade Natural à Erosão dos Solos da Bacia do Olaria – DF. In: **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, nº 14. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.
- BRITO, W. B. M.; CAMPOS, M. C. C.; BRITO FILHO, E. G.; LIMA, A. F. L.; CUNHA, J. M.; SILVA, L. I.; SANTOS, L. A. C.; MANTOVANELLI, B. C. Dynamics and spatial aspects of erodibility in Indian Black Earth in the Amazon, Brazil. In: **Catena**, vol. 185, 2020, p. 1 – 10.
- CASTRO, W. J.; CASTRO, M. L. L.; LIMA, J. O.; OLIVEIRA, L. F. C.; FIGUEIREDO, C. C. Erodibilidade de solos do Cerrado Goiano. In: **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, vol. 4, nº2. 2011, p. 305-320.
- COELHO, M. R.; LUMBREZAS, J. F.; AMARAL, A. J. VASQUES, G. M.; BACA, J. F. M.; DART, R. O.; PEDREIRA, J. P. N. C. Erodibilidade dos solos do Brasil. In: **Documentos** 246. Rio de Janeiro/RJ: EMBRAPA SOLOS, 2024, 38p.
- DENARDIN, J. E. **Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. Tese (doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba/SP, 1990, 81p.
- DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P.; BRITO, W. B. M.; SILVA, T. A. Determinação da erodibilidade do solo por meio de dois métodos indiretos em uma bacia hidrográfica na região sul do estado do Amazonas, Brasil. In: **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 21, nº 2, 2020, p.329-341.
- EDUARDO, E. N.; CARVALHO, D. F.; MACHADO, R. L.; SOARES, P. F. C.; ALMEIDA, W. S. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, sob condições de chuva natural. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 37. Viçosa/MG: SBCS, 2013, p.796-803.



- FRANÇOIS, M.; PONTES, M. C. G. VASCONCELOS, R. N.; OLIVEIRA, U. C.; SILVA, H. P.; FARIA, D.; MARIANO-NETO, E. Assessing soil erosion and its drives in agricultural landscapes: a case in southern Bahia, Brazil. In: **Journal of Water & Climate Change**, vol. 15, nº7, 2024, p. 3.313-3.327.
- FRANCISCO, R. M. P.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, F. P.; RIBEIRO, G. N.; SILVA, V. F.; AYRES, G. D. J.; RODRIGUES, R. C. M. Estimate of the vulnerability to erosion of the soils in the state of Paraíba. In: **Journal of Hyperspectral Remoting Sensing**, vol. 13, nº 2, 2023, p. 281-295.
- GALINDO, I.C.; MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 13, 1989, p.95-100.
- GODOI, R. F.; RODRIGUES, D. B. B.; BORRELLI, P.; OLIVEIRA, P. T. S. High-resolution soil erodibility map of Brazil. In: **Science of the Total Environment**, vol. 781, 2021, p.1-10.
- GRAÇA, C. H.; SILVEIRA, H. Vulnerabilidade à contaminação das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapó, Paraná. In: **Revista do Departamento de Geografia**, vol. 40. São Paulo/SP: USP, 2020, p. 175-190.
- GUPTA, S.; Borrelli, P.; Panagos, P.; Allewell, c. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. In: **Science of the Total Environment**, vol. 908, Elsevier, 2024, p.1-13.
- HASSANE, A. L.; CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; SANTOS, R. V.; CUNHA, J. M.; BRITO, W. M. P.; LIMA, A. F. L.; BRITO FILHO, E. G.; OLIVEIRA, F. P. Estimating soil erodibility in areas under natural and anthropic environments in the southern region of Amazonas State. In: **Bragantia**, vol. 82. Campinas/SP:2023, p. 1-13.
- HENNIG, T. B.; MOTA, A. A. Avaliação do potencial de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica do Oeste Catarinense. In: **Revista de Geografia**, vol. 43, nº 02. Rio Claro/SP:UNESP, 2018, p.255-277.
- LENSE, G. H.; PARREIRAS, T. C.; SPALEVIC, V.; AVANZI, J. C.; MINCATO, R. L. Soil losses in the State of Rondônia, Brazil, In: **Ciência Rural**, vol. 51, nº 5, 2021, p. 1-10.
- MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda de solos do Estado de São Paulo. In: **Acta Scientiarum**, vol. 24, nº 5. Maringá/SP, 2002, p. 1335-1340.
- MELO, A. C. A.; ALBUQUERQUE, L. B.; VILELA, M. F. Relação do uso e da ocupação do município de Águas Lindas e seus impactos ambientais. In: **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 14, nº 02. Recife/PE, 2021, p. 634-649.
- MELO, O. A. G.; SANTOS, M. L.; O modelo hidrológico SWAT aplicado à análise da produção de sedimentos da bacia do rio Avaf-PR. In: **Estudos Geográficos**, vol. 18. Rio Claro/SP: UNESP. 2020, 19p.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade agrícola. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Genesis. Porto Alegre/RS, 1999, 508p.
- MIGUEL, P. DALMOLIN, R. S.; MOURA-BUENO, J. M.; SOARES, M. F.; CUNHA, H. N.; ALBERT, R. P.; STUMPF, L.; LEIDEMER, J. D. Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta. In: **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. Vol. 26, nº 1. 2021.
- NUNES, N. C. **Análise espaço-temporal da erosão hídrica em bacias hidrográficas no Sudoeste de Goiás**. 2020. Dissertação (mestrado). Programa de Pós – Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Rio Verde/GO, 2020, 61p.
- OLIVEIRA, A. H.; KLINKE NETO, G.; PEREIRA, S. Y. Estimation of erosion and deposition by Unit Stream Power Erosion and Deposition in a sub-basin on the Mogi Guaçu River's margins, municipality of Mogi Guaçu, SP, Brazil. In: **Geologia USP. Série Científica**, vol 22, nº 01, São Paulo/SP, 2022, p.77-92.
- OLIVEIRA, J. A. X.; ALMEIDA, F. T.; SOUZA, A. P.; PAULISTA, R. S. D.; ZOLIN, C. A.; HOSHIDE, A. K. Determination of soil erodibility by different methodologies in the Renato and Caiabi River Sub-Basins in Brazil. In: **Land**, vol. 13, nº 1442, 2024, p. 1-17.
- PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; BALLABIO, C.; BARRELLI, P. Soil erodibility in Europe: a high-resolution dataset based on LUCAS. In: **Science of The Total Environment**, vol.479-480, Elsevier: 2014, p. 189-200.
- ROSA, L. S.; CHEREM, L. F. S.; SIAME, L.O papel de fatores naturais e antrópicos na variabilidade da perda de solos no estado de Goiás entre 1985 e 2018. In: **Revista Sociedade & Natureza**, vol. 35. Urbelândia/MG, 2022, 16p.
- SANTOS, S. L. M.; SILVA FILHO, E. P. Direct determination of erodibility in different forms of slopes in the Belmont Stream Basin in Porto Velho-Rondônia-Brazil. In: **Revista Foco**, vol. 16, nº 1. Curitiba/PR: 2023, p. 1-26.



SHI, D.; JIANG, G.; PENG, X.; JIN, H.; JIANG, N. Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region, China. In: **Catena**, vol. 202, 2021, 8p.

SILVA, C. B. **Evolução morfodinâmica e análise de riscos geomorfológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama – PE**. 2025. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE. 2025, dados não publicados.

SILVA, C. B. *et al.* **Levantamento de Reconhecimento de solos de alta intensidade da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama - PE**. 2025, dados não publicados.

SILVA, D. F.; BARBOSA NETO, M. V.; MIRANDA, M. R. B.; LIRA e SILVA, J. F. Análise do potencial de perda de solo da Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão - PE. In: **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 15, nº 04, 2022, p. 2025-2041.

SILVA, F. B. R.; SILVA, M. A. V.; BARROS, A. H. C.; SANTOS, J. C. P.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B.; BURGOS, N.; PARAHYBA, R. B. V.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SOUZA NETO, N. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LOPES, O. F.; LUZ, L. R. Q. P.; LEITE, A. P.; COSTA, L. G. M.; SILVA, C. P. **Zoneamento Agroecológico de Pernambuco - ZAPE**. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pernambuco - UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária). (Embrapa Solos. Documentos nº 35). ZAPE Digital, CD-ROM. 2001.

SILVA, T. I.; RODRIGUES, S. C. **Tutorial de Cartografia Geomorfológica**. Laboratório de Geomorfologia e Erosão dos Solos – Instituto de Geografia – UFU. 2009. 66p.

SILVA, T. S. **Erodibilidade de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO e fator manejo e cobertura vegetal da Equação Universal de Perdas de Solo**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós - Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2016, 166p.

SOORYAMOL, K.R.RAJ; KUMAR, S.; A.D. Modelling climate change impact on soil loss and erosion vulnerability in a watershed of Shiwalik Himalayas. In: **Catena**, vol. 14, 2022, p.

SOUZA, F. G.; SILVA, J. V.; SAMPAIO, T. I.; MORAIS, J. T.; MOURA, V.; LIMA, A. F. L.; BRITO, W. B. M.; PINHEIRO, E. N.; SANTOS, R. V.; CAMPOS, M. C. C; Soil erodibility in areas under citrus (*Citrus sinensis* L. Osbeck) and forest in Rondônia, Brazil. In: **Revista de Agricultura Neotropical**, vol. 10, nº 4, Cassilândia/MS: 2023, p. 1-13.

THOMAZ, E. L.; FIDALSKI, J. Interrill erodibility of different sandy soils increases along a catena in the Caiuá Sandstone Formation. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 44, 2020, p. 1-13.

XU, Y.; SUN, H.; JI, X. Spatial-temporal evolution and driving forces of rainfall erosivity in a climatic transitional zone: A case in Huaihe River Basin, eastern China. In: **Catena**, vol. 198, 2021, 13p.

ZANCHIN, M.; MOURA, M. M.; NUNES, M. C. M.; TUCHTENHANGEN, I. K.; LIMA, C. L. Assessment of soil loss susceptibility in Santa Rita watershed in Southern Brazil. In: **Revista Engenharia Agrícola**, vol. 41, nº 4. Jaboticabal/SP, 2021, p. 485-495.

ZHU, X.; LIANG, Y.; TIAN, Z.; WANG, X. Analysis of scale-specific factors controlling soil erodibility in southeastern China using multivariate empirical mode decomposition. In: **Catena**, vol. 199, 2021, p.1-10.

WANG, H.; ZANG, G. Temporal variation in soil erodibility indices for five typical land uses types on the Loess Plateau of China. In: **Geoderma**, vol. 381, 2021, 11p.

WANG, H.; WANG, J.; ZHANG, G. Impact of landscape positions on soil erodibility indices in typical vegetation-restored slope-gully systems on the Loess Plateau of China. **Catena**, vol. 201, 2021 p. 1-11.

WILLIAMS, J. R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: a case history. In: **Quantitative Theory of Soil Productivity and Environmental Pollution**, vol. 329, nº 1.255. UK/ Royal Society-Philosophical Transactions Biological Sciences, 1990, p.421-428.

WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B. AND CROSS, B.V. A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. In: **Journal of Soil and Water Conservation**, vol.26, 1971, 189-193.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978.



ESTRATIGRAFIA DOS PREENCHIMENTOS SEDIMENTARES EM BACIAS DE DISSOLUÇÃO NA SERRA DA BAIXA VERDE

Jeovanes Lisboa da Silva Filho¹
Jonas Otaviano Praça de Souza²

PALAVRAS-CHAVE: Bacias de Dissolução; Estratigrafia; Geoquímica; Semiárido.

RESUMO

Tendo-se em vista a diversidade paisagística e geomorfológica do semiárido brasileiro, se faz necessário o desenvolvimento de pesquisas que possam compreender os processos geomorfológicos atuantes ao longo do tempo. O artigo tem como objeto de estudo das Bacias de Dissolução e seus preenchimentos sedimentares, centrados nas encostas e patamares com altitudes superiores a 700 m, no maciço residual da Serra da Baixa Verde PB/PE. O fundamento balizador da pesquisa foi de que as feições geomorfológicas trabalhadas, sazonalmente alagadas, sua gênese está associada ao intemperismo químico atuante ao longo do tempo, sob condições de climas secos (semiárido). A pesquisa percorreu os seguintes procedimentos metodológicos: identificação e mapeamento das bacias de dissolução; análise sedimentológica; análise morfoestratigráfica e análise geoquímica. Desse modo, este artigo apresenta a caracterização sedimentológica, geoquímica e morfoestratigráfica, que permitiram compreender o encadeamento evolutivo dos preenchimentos sedimentares das Bacias de Dissolução. A análise geoquímica, por da técnica Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), a qual evidenciou o grau de alteração dos sedimentos, através dos índices de K_i e K_r , além da composição química, que está em consonância com a litologia local. Os dados indicaram que os sedimentos são de caráter *in situ*, e geoquimicamente pouco amadurecidos, com grande concentração de sílica, alumínio, ferro e potássio. Foi identificado, também, óxidos considerados poluentes como o Pentóxido de Difósforo (P_2O_5) e o Trióxido de Enxofre (SO_3). As características dos sedimentos, tais como a granulometria, sua natureza química e arranjo estratigráfico forneceram dados de processos pretéritos, indicando que a morfologia da paisagem emerge das ligações entrelaçadas entre litologia, solos, clima, resistência ao intemperismo, entre outros. Logo, a presente pesquisa colabora com a compreensão da evolução de Bacias de Dissolução no semiárido do Nordeste brasileiro.

¹ Doutorando em Geografia, Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, jeovanes.lisboa@academico.ufpb.br

² Doutor em Geografia e Professor do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, jonas.souza@academico.ufpb.br



INTRODUÇÃO

A área em estudo centra-se na Serra da Baixa Verde PB/PE, que é um compartimento do relevo que está sobre o nível geral do Planalto da Borborema, sob a forma de cristas e maciços residuais, que se constitui em um dos maiores espaços de exceção climático-ecológico do semiárido do Nordeste do Brasil, um Brejo de Altitude (CORREA, 1997). O Planalto da Borborema, por sua vez, corresponde ao conjunto de terras altas contínuas que se distribuem ao longo da fachada do Nordeste oriental do Brasil, onde os limites são marcados por uma série de desnivelamentos topográficos, cuja gênese epirogênica está ligada ao desmantelamento de Gondwana e ao magmatismo intraplaca atuante ao longo do Cenozóico (CORREA *et al.*, 2010).

As Bacias de Dissolução na paisagem na Serra da Baixa Verde estão sujeitas aos mesmos impactos resultantes dos processos erosionais que ocorrem nos rios. A retirada da vegetação, o manejo inadequado do solo e a ocupação das áreas ao entorno influenciam, diretamente, os regimes hidrológicos, hidráulicos e sedimentológicos, além da qualidade de suas águas superficiais (BELLINASSO e PAIVA, 2007; FERREIRA, 2012).

Portanto, a caracterização geomorfológica e a compreensão da evolução dessas Bacias de Dissolução em ambiente semiárido e suas áreas de exceção é significativo. Entender as nuances presentes na complexidade dos elementos geológicos, climatológicos, pedológicos, vegetação, recursos hídricos, entre outros, requer uma análise sistêmica da estrutura física da paisagem.

A perspectiva norteadora deste artigo é de que as feições geomorfológicas trabalhadas, sazonalmente alagadas, sua gênese está associada ao intemperismo químico atuante ao longo do tempo, sob condições de climas secos (semiárido e sub-úmido), estocando sedimento *in situ*, se configurando como um instrumento indispensável à interpretação das mudanças ambientais recentes. Desse modo, o objetivo central foi realizar uma caracterização do cenário geomorfológico dessas feições.

Assim, a identificação das Bacias de Dissolução foi o primeiro passo, onde em sequência foi realizada a caracterização morfológica, sedimentológica, morfoestratigráfica e geoquímica, numa perspectiva de entendimento da gênese, evolução e dinâmica ambiental das Bacias de Dissolução.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

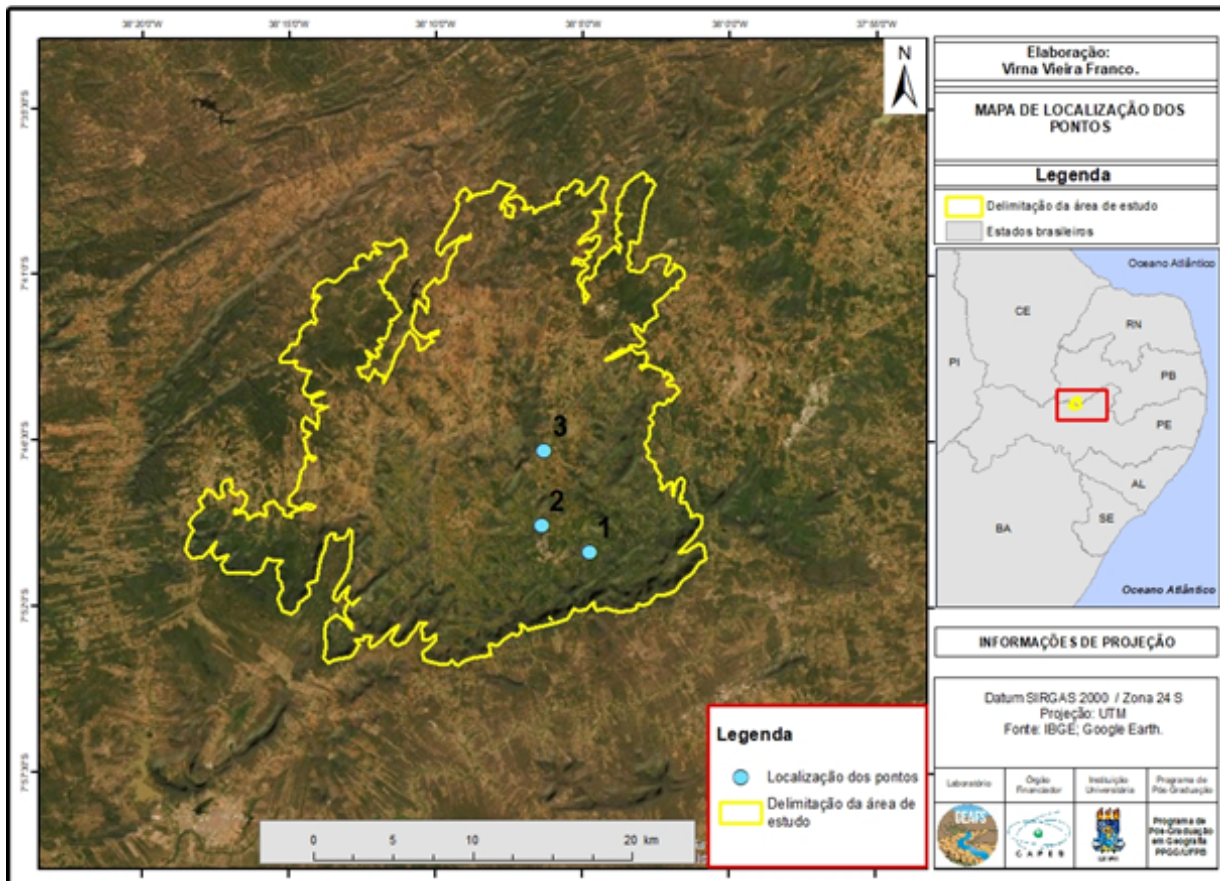
2.1 Localização da Área

A área em estudo localiza-se no limite Pernambuco-Paraíba PE/PB, figura 01, centrada nas encostas e patamares com altitudes superiores a 700 metros, no maciço



residual da Serra da Baixa Verde. Foram identificados e mapeados três pontos, onde apenas o ponto 03 foi escolhido para realizar as coletas de sedimentos para análises laboratoriais, centrado na unidade geológica denominada Suíte Intrusiva Triunfo - Pluton Triunfo, contendo as seguintes litologias: Álcali-feldspato sienitos e Álcali feldspato quartzo sienito equigranulares; de granulação média e grossa.

FIGURA 01: Localização da Área de Estudo.



FONTE: os autores, 2020.

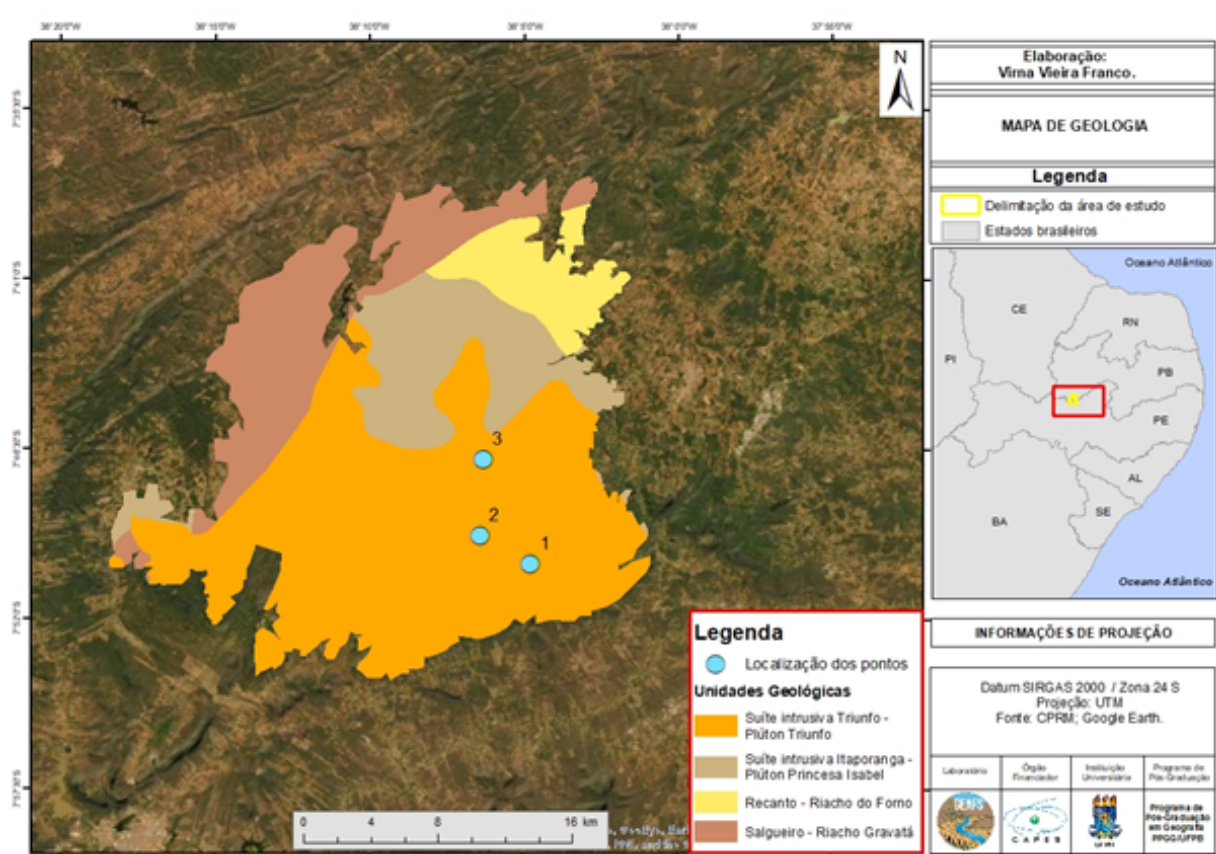
2.2 Aspectos Geológicos

Na Serra da Baixa Verde a Geologia é formada por uma suíte ultrapotássica/peralcalina de idade neoproterozoica superior, evento brasileiro (por volta de 500 milhões de anos). Tem grande destaque, também, uma mistura de rochas vulcânicas e metamórficas, em proporções variadas, relativas ao Complexo Migmatítico-Granitoide (CPRM, 2014).

Na área de estudo, foram identificadas e mapeadas 04 Unidades Geológicas da área em estudo, figura 02, quais sejam: Recanto Riacho do Forno, Salgueiro – Riacho Gravatá, Suíte Intrusiva Triunfo – Plúton Triunfo, Suíte Intrusiva Itaporanga – Plúton Princesa Isabel.



FIGURA 02: Mapa Geológico.



FONTE: os autores, 2020.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa percorreu os seguintes procedimentos metodológicos: **a)** identificação e mapeamento das bacias de dissolução; **b)** levantamento topográfico; **c)** análise sedimentológica; **d)** análise morfoestratigráfica **e)** análise geoquímica.

3.1 Identificação e mapeamento das bacias de dissolução

Foi realizada uma busca na área de estudo por meio do Google Earth, tendo como base as imagens do dia 26/11/2011. Na sequência, foi realizado um trabalho de campo exploratório, entre os dias 22 e 24 de abril de 2019, na perspectiva de um reconhecimento geral da área estudada, bem como identificar as características específicas dos pontos visitados. (Planilha de Campo). Os pontos *in loco* foram marcados com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) Garmin 64s, e as fotografias foram registradas com câmera fotográfica.

Os critérios de escolha desses pontos foram às diferenças entre as cotas altimétricas, declividade, vegetação, precipitação, formas e profundidades das Bacias de Dissolução, intervenções humanas (barramentos) e os respectivos usos.



3.2 Análise Morfoestratigráfica

O método estratigráfico utilizado seguiu as orientações de Suguio (2010). Foram confeccionadas seções estratigráficas verticais dos preenchimentos sedimentares, onde foram selecionados os pontos de amostragem de sedimentos.

As amostras foram coletadas nas trincheiras, escavadas desde a superfície até o embasamento rochoso. Como parâmetro, foi levado em consideração as discontinuidades identificadas ao longo das seções, principalmente a variação na coloração. Também foi realizada uma descrição da macro-fábrica dos sedimentos na própria trincheira.

3.3 Análise Sedimentológica

3.3.1 Granulometria

A granulometria das areias e dos cascalhos foi estabelecida por meio do peneiramento das amostras, onde as frações de silte e argila foram dispensadas. As informações obtidas para a metodologia seguiram as orientações de Gale e Hoare (1991), utilizando-se o peneiramento seco para as frações de areia e cascalho. Os valores obtidos das frações granulométricas foram submetidos aos parâmetros estatísticos propostos por Folk e Ward (1957).

Inicialmente, todas as amostras foram para a estufa, e após a secagem passaram pelo peneiramento, utilizando um conjunto de peneiras com intervalos sucessivos de 1 phi (ϕ) no intuito de determinar as frações de areia muito fina, areia fina, areia média, areia grossa e cascalho. Os valores obtidos em grama para cada fração granulométrica foram submetidos a tratamento seguindo os parâmetros estatísticos de Folk e Ward (1957), tendo sido calculado o diâmetro médio, o grau de seleção, o grau de assimetria, e curtose. As amostras foram processadas no Laboratório de Estudos Geológicos e Ambientais - LEGAM, do Departamento de Geociências da Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

A separação das frações de silte e argila foram estabelecidas com granulômetro à laser, num sistema óptico de captação com 38 sensores de marca IngkeScientific/Wurtech. A preparação das amostras seguiu as recomendações metodológicas do Laboratório de Materiais Metálicos, Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba –UFPB.

3.4 Análise Geoquímica

3.4.1 FRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios X

A Espectrometria de Fluorescência de Raios X - FRX, foi fundamental para definir os elementos químicos das amostras a partir de óxidos, além de contribuir para determinar as taxas de intemperismo, caracterização geoquímica, origem do sedimento, entre outros (SILVA, 2016, GONÇALVES, 2018; FONSECA *et al.*, 2020).



Neste trabalho, as amostras coletadas em trabalho de campo, por unidade estratigráfica, foram organizadas e processadas seguindo as orientações do Laboratório de Qualidade Ambiental - LAQA, do Departamento de Química de Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

3.4.2 Índices de KI e KR

A aplicação dos índices de Ki e Kr, foi realizado para se quantificar o grau de intemperismo através das seguintes razões:

$$K_i = (1,7. SiO_2/Al_2O_3) / K_r = \{1,7. SiO_2/ [Al_2O_3 + (0,6. Fe_2O_3)]$$

O cálculo foi feito nas amostras que foram coletadas em todos os horizontes da caracterização morfoestratigráfica. Os sedimentos podem ser encaixados dentro de quatro categorias analíticas em relação aos índices Ki e Kr e suas combinações. Sendo o índice $K_i > 2,2$ e $K_r > 0,75$ há uma concentração maior de sialíticos, denunciando a presença maior de silício, alumínio e baixo grau de intemperismo; com o $K_i > 2,2$ e $K_r > 0,75$, há maior ocorrência de fersialíticos, denunciando uma maior presença de ferro e silício, além de alto grau de intemperismo; por último, com os índices $K_i < 2,2$ e $K_r < 0,75$ que há ocorrência de ferralíticos com baixa concentração de silício e elevada concentração de alumínio e ferro, além de alto grau de intemperismo (OLIVEIRA, 2005; SOARS, 2019).

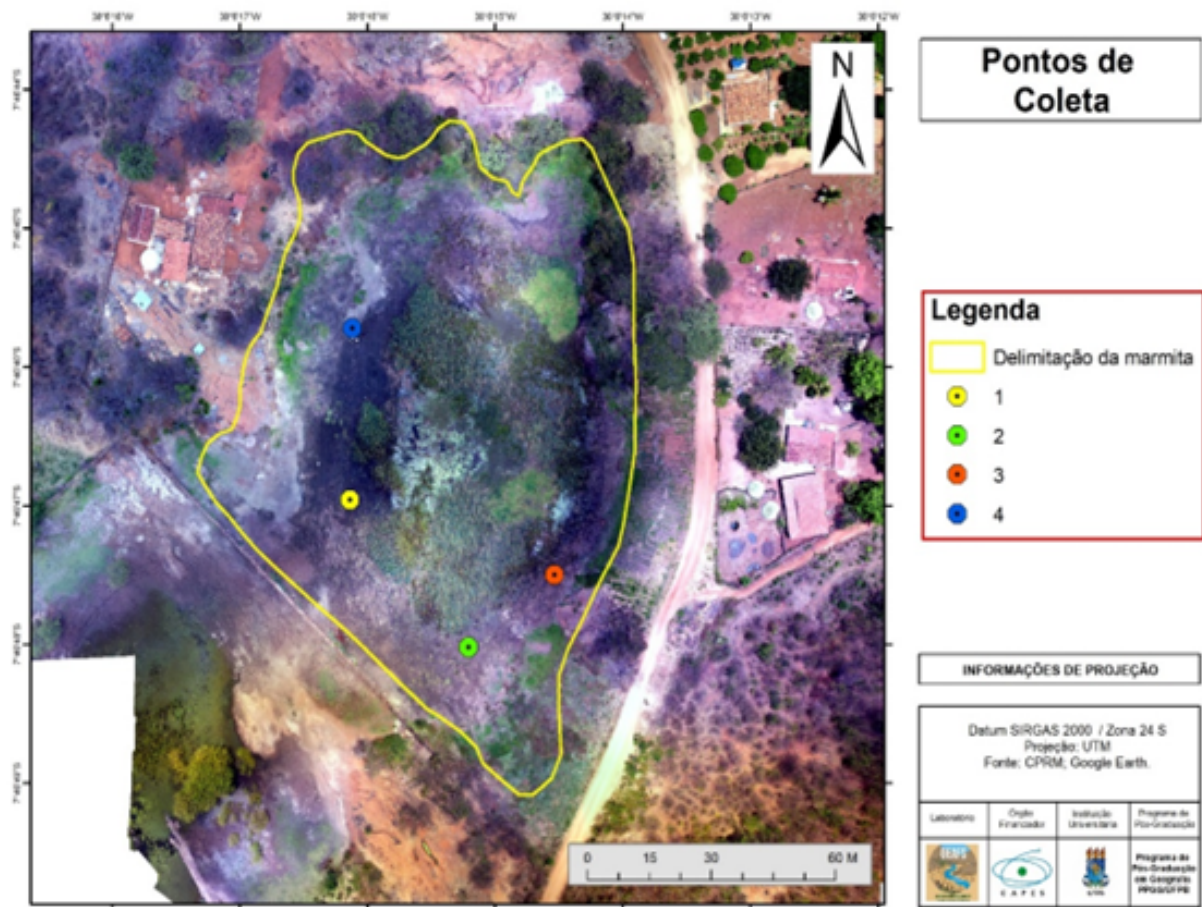
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise Sedimentológica e Morfoestratigráfica

As análises sedimentológicas e morfoestratigráficas foram realizadas nos pontos identificados na figura 3. De todos os pontos coletados, este artigo irá apresentar os dados obtidos no ponto 01 de coleta, localiza-se sob uma morfologia que varia de plano para suave ondulada, em cotas altimétricas de 770 metros, e topografia de baixa declividade, com leves ondulações. O período seco favoreceu a diminuição da saturação dos preenchimentos sedimentares, viabilizando a coleta de material para as análises laboratoriais.



FIGURA 03: Pontos de Coletas



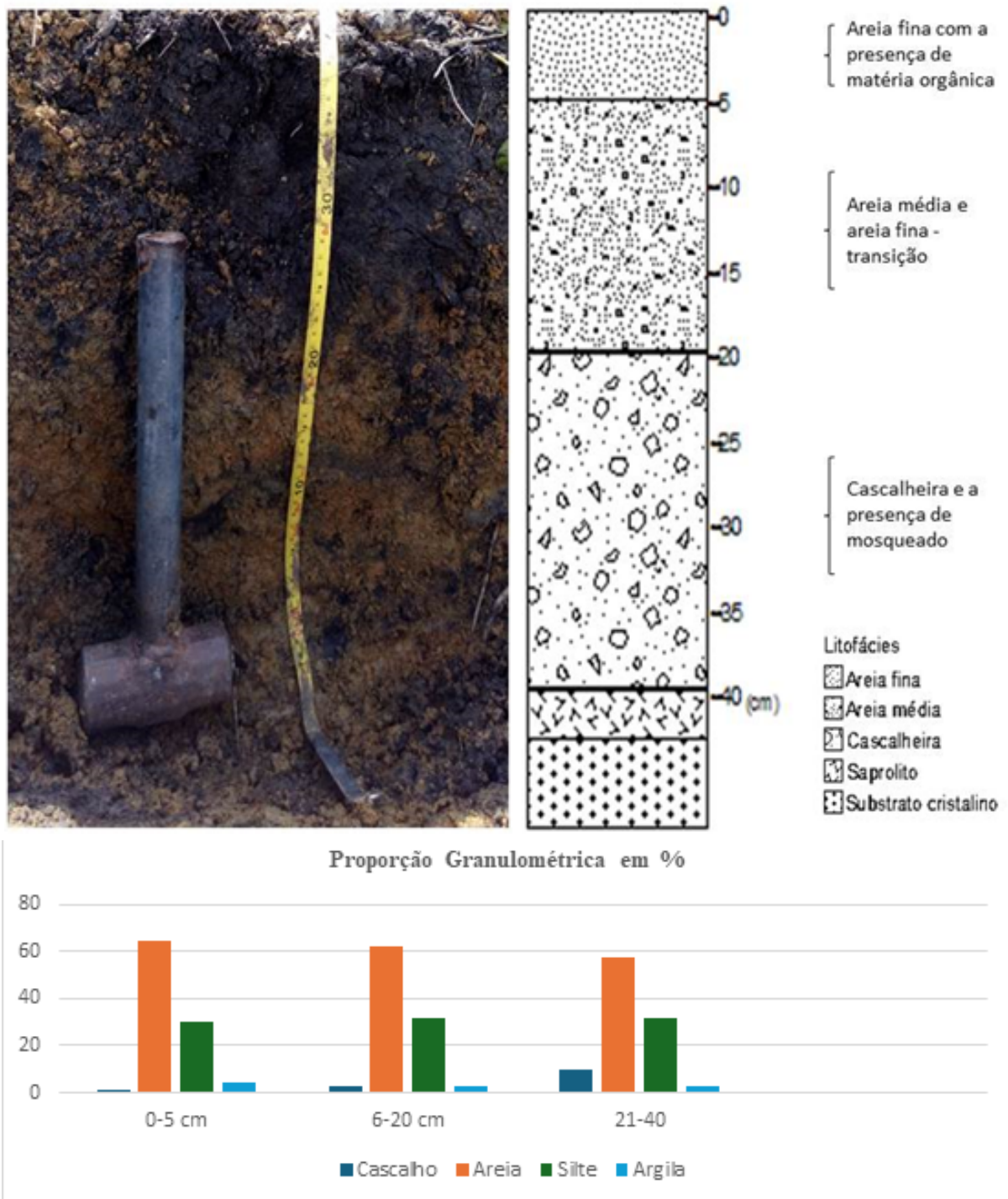
FONTE: os autores, 2020.

5.2.1 Estratigrafia e Sedimentologia do Ponto 01

Na figura 04, observa-se o perfil estratigráfico do ponto 01, com 40 cm de espessura, contendo três unidades estratigráficas. Os dados apontam uma presença maior de material cascalhento na unidade basal (21 cm – 40 cm), com 10% do total da amostra.



FIGURA 04: Perfil estratigráfico do ponto de coleta 01.



FONTE: os autores, 2020.



TABELA 01: Caracterização sedimentológica com os valores de curtose, assimetria, classificação do sedimento e grau de seleção das amostras.

Profundidade	Grau de Seleção	Assimetria	Curtose	Classificação do Sedimento
0 – 5 cm	Pobrementemente selecionado	Positiva	Platicúrtica	Areia Fina
6 – 20 cm	Pobrementemente selecionado	Muito negativa	Platicúrtica	Areia Fina
21 – 40 cm	Muito pobrementemente selecionado	Aproximadamente simétrica	Muito platicúrtica	Areia Fina

Em todas as camadas o sedimento foi classificado como areia fina. Já a assimetria é distinta para as três camadas, revelando a heterogeneidade granulométrica dos grãos. A assimetria positiva na unidade superficial está em consonância com a maior quantidade de grãos de areia identificada na amostra. De forma geral, a granulometria aponta grande concentração de areia, variando de 64,5% (0-5 cm); 62,1% (6-20 cm) e 57% (21-40 cm). A segunda maior concentração de grãos foi o silte, com valores que variam de 30% a 32 %, e a argila contém as menores concentrações.

Quanto ao grau de seleção, variou entre grãos pobrementemente selecionados nas camadas de (0-5 cm; 6-20 cm) e muito pobrementemente selecionado na unidade basal (21-40 cm). A curtose é tanto Platicúrtica quanto muito Platicúrtica, que está relacionada ao predomínio de frações mais finas.

Na unidade basal, verifica-se o manto de alteração marcado pelo saprolito, com maior concentração de cascalho, evidenciado um material em estágio menor de decomposição. As descrições em campo ajudaram a identificar as diferentes discontinuidades a partir da coloração entre as camadas.

O coeficiente de seleção do grão nas amostras de todos os pontos indicou a predominância de grãos pobrementemente selecionados, que está relacionado a ambientes semiáridos, devido à concentração e irregularidade das chuvas, além de revelarem a heterogeneidade de frações por amostra (CARMAGO FILHO e BIGARELLA, 1998; TAVARES e GALVÃO, 2016).

Pesquisas que realizaram análises granulométricas no semiárido, como Silva (2013; 2017; 2023), ao caracterizar os preenchimentos sedimentares das Marmitas em Fazenda Nova (PE) e Afrânio (PI), identificaram uma expressiva quantidade de areia nas amostras analisadas, ratificando que as condições climáticas influenciam na granulometria. Dados semelhantes foram obtidos por Goes (2019) em trabalho recente



sobre a geocronologia de terraços fluviais e os aluviões no estado da Bahia, com clima tropical semiárido, onde os dados sedimentológicas revelaram amostras com 70%, e/ou mais de 70% de grãos de areia.

Barros (2014), por sua vez, um dos pontos do seu trabalho está localizado numa altitude de 750 metros, na Serra da Baixa Verde, especificamente na Bacia do Riacho Grande - PB. A altitude está bem similar ao ponto do presente trabalho que mede 770 m. O perfil apresenta profundidade de 65 cm, contendo três unidades estratigráficas, cuja granulometria predominantemente arenosa, pobremente selecionada, com cerca de 60% de fração areia e 30% de cascalho para 10% de silte. Observa-se que do ponto de vista da quantidade de areia, há uma similaridade com os dados encontrados no presente trabalho.

Fonsêca (2018; 2024) no estudo sobre a gênese da paisagem geomorfológica do Quaternário Tardio, com ênfase no rebordo oriental do Piemonte da Borborema, pela distribuição espacial dos pontos selecionados obteve dados granulométricos heterogêneos, os quais são influenciados pela espessura do solo, condições climáticas, quantidade de chuva, geologia local, entre outros. Todavia, a geoquímica das amostras também influencia nas características granulometrias, onde as amostras com maior concentração de sílica (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3) apresentam granulometria com altas concentrações de areia, e consequentemente, com grãos de quartzo (FONSÊCA *et al.*, 2020).

No semiárido do Nordeste brasileiro, encontram-se algumas pesquisas já desenvolvidas, tendo como foco a caracterização sedimentológica e morfoestratigráfica, com auxílio de técnicas de datação: Correa, (1997, 2001); Galvão, (2012); Mutzenberge *t al.*, (2013); Tavares; Lima *et al.*, (2017); Silva, Correa e Amorim (2017); Fonseca *et al.* (2020); Lima, Cunha e Perez Filho (2016); Amorim *et al.*, (2020), entre outros. Os resultados indicam que a atual estrutura superficial das paisagens do semiárido brasileiro, em sua maioria, são resultados dos processos geomorfológicos ocorridos ao longo de diferentes eventos climáticos.



6. ANÁLISE GEOQUÍMICA

A aplicação da técnica Espectrometria de Fluorescência de Raios X – FRX objetivou compreender a proveniência e o grau de alteração do sedimento, além de caracterizar geoquimicamente e estabelecer correlação com as unidades morfoestratigráficas caracterizadas no tópico anterior.

TABELA 02: Análise Geoquímica em %

PONTO 01			
PROFUNDIDADE EM (CM)	0-5	6-20	21-40
SiO ₂	61	59.8	56.9
Al ₂ O ₃	17.7	17.9	17.7
Fe ₂ O ₃	7.07	7.7	11.9
K ₂ O	8.4	8.4	5.8
CaO	1.9	1.9	3.2
SO ₃	1.8	1.5	1.6
MgO	-	0.728	0.95
TiO ₂	0.684	0.576	0.760
ZnO	0.007	0.007	0.008

FONTE: os autores, 2025.

Os elementos químicos identificados estão diretamente relacionados com a geologia local, os quais variam entre aqueles mais abundantes na superfície terrestre, com grande concentração de sílica, alumínio, ferro e potássio, considerados os elementos maiores, além daqueles de menor abundância, mas de grande relevância geológica como titânio e zinco, chamados de traços.

A grande abundância de sílica, registrando um percentual que varia entre 55% e 66% em cada amostra, ratifica o pouco amadurecimento intempérico do sedimento. Outra explicação para a abundância da sílica, é devido a sua resistência na forma de quartzo (SALGADO, 2002; CRUZ, 2003; CRUZ, 2006). Os teores elevados de (K₂O) potássio variam entre 4,9% e 9,4% são condizentes com as rochas graníticas CPRM (2017), como os sienitos alcalino-feldspato da Suíte Triunfo, bem como pela presença de minerais primários, como o feldspato alcalino.



As análises ainda demonstraram uma baixa concentração de elementos facilmente mobilizados como o (ZnO) óxido de zinco, (MnO) manganês, (SrO) estrôncio, (ZnO) zinco, (Rb₂O) *óxido* de rubídio, (Cr₂O₃) óxido de cromo, (Y₂O₃) óxido de ítrio, (TiO₂) titânio, (SO₃) trióxido de enxofre, (CeO₂) óxido de cério, (NiO) Óxido de níquel, (Br) que é um composto inorgânico e binário, contendo dois oxigênios ligados entre si.

O comportamento do (ZrO) óxido de zinco, apresenta-se de acordo com uma alteração *in situ* esperada para perfis de solo, ou seja, sendo enriquecido em termos de quantidade em direção ao topo (FRIEDRICH *et al.*, 1992; CRUZ, 2003). Quando se observa os valores de Zr obtidos no presente trabalho, verifica-se que há um leve aumento na porcentagem da camada basal até a superficial. Além do mais, as concentrações dos óxidos identificados estão em consonância com a litologia local, ratificando o caráter *in situ* dos preenchimentos sedimentares

A concentração dos elementos maiores identificados, são semelhantes as concentrações identificadas por Silva *et al.*, (2020), quais seja: Si; Al; K; Fe; Ti; Na; Mg; Ca; P; Mn para solos formados em rochas de litologia cristalina, situadas em condições sub-úmidas. Essas informações estão em consonância com as características da área em estudo, situada em cotas superiores a 700 metros, na Serra da Baixa Verde PB/PE.

6.1 Análise dos Índices Ki e Kr

Os dados geoquímicos permitiram avaliar a situação do processo intempérico dos pontos analisados, assinalando as discontinuidades presentes nas camadas morfoestratigráficas através dos índices Ki (1,7. SiO₂/Al₂O₃) e Kr {1,7. SiO₂/ [Al₂O₃ + (0,6. Fe₂O₃)]} para todas as amostras. Os índices de Ki e Kr, representados no quociente entre os elementos de alta mobilidade (sílica) pelos elementos de baixa mobilidade (alumínio e ferro) no sistema, revelam o grau intempérico das amostras. Quanto menor sua concentração, maior o grau de intemperismo. Ao ponto que, quanto maior a concentração dos índices menor será o grau intempérico (OLIVEIRA, 2005).

Na tabela 09 é possível observar os dados com os índices Ki e Kr. Moniz (1972); Oliveira (2005); Soars (2019); baseando-se na classificação francesa de pedologia, define os solos como: sialíticos, fersialíticos, alíticos e ferralíticos utilizando os índices Ki e Kr. Tendo em vista essas quatro categorias, as amostras de sedimentos do trabalho em tela são do tipo sialíticos, uma vez que os valores de Ki e Kr são superiores a $Ki \geq 2,2$ e $Kr \geq 0,75$, revelando a presença maior de silício e alumínio, e um estágio inicial de intemperismo.



TABELA 06: Índices de Ki e Kr

QUANTIDADE DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO - ÍNDICES DE KI E KR					
Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr
PONTO 01					
0 – 5 cm	61%	17,7%	7,07%	5,86%	4,73
6 – 20 cm	59,8%	17,9%	7,7%	5,68%	4,51
21 – 40 cm	56,9%	17,7%	11,9%	5,46%	3,89

FONTE: os autores, 2020.

Os índices apontaram que todos os pontos apresentam sedimentos geoquimicamente pouco amadurecidos, devido aos altos valores encontrados, pois quanto maior o valor dos índices de Ki e Kr, menor é o grau de intemperismo. De forma geral, os valores obtidos nos índices não apresentam grandes variações.

A literatura releva que as rochas que contêm uma alta proporção de quartzo, feldspato, e de potássio, geralmente são mais resistentes ao intemperismo. E nas áreas de escudo pré-cambriano, que experimentaram várias fases de intrusão magmática, deformação tectônica e metamorfismo, os granitóides mais jovens geralmente são mais resistentes ao intemperismo (CAMBRIDGE, 1986; PYE, 1986; ZQUEZ, 2016; EGGETON, 2017).

Além do mais, vários trabalhos afirmam que a granulação da rocha também influencia no processo de intemperismo, onde as rochas com granulação média e grossa, tendem a se diluir de forma mais lenta (BERNER, 1979; WHITE e BRANTLEY, 1995; LUTTGE, 2005). A litológica da área em foco é marcada por rochas de granulação média e grossa. Essas informações são mais um indicativo do pouco amadurecimento intempérico dos sedimentos aqui estudados, como apontou os índices de Ki e Kr.

Em consequência, alguns estudos evidenciam que quando o intemperismo é fraco, os solos tendem a ser relativamente jovens e, portanto, muitas propriedades do solo, como a distribuição do tamanho dos grãos e a mineralogia são essencialmente herdada dos materiais originais, ou seja, *in situ* (GONG, 1999; BAUMANN *et al.*, 2014; LIN e FENG,



2015; ZHANG *et al.*, 2020). Todavia, também entende-se que os solos se desenvolvem sob a influência dos seguintes fatores: material parental, clima, topografia, atividade biológica e tempo (JENNY, 1941; ZHANG *et al.*, 2020).

O grau de amadurecimento não reflete diretamente na idade de das unidades estratigráficas, uma vez que não necessariamente o material mais intemperizado tem idade mais antiga (FONSÊCA *et al.*, 2020). Então, para apontar a datação exata do sedimento, é necessário utilizar técnicas específicas de datação. Ao estabelecer correlação desses dados com outros trabalhos realizados no semiárido brasileiro, encontra-se Fonseca (2018) em sua proposta de compreender a gênese e evolução da paisagem geomorfológica ao longo do Quaternário Tardio, com ênfase no rebordo oriental do Piemonte da Borborema, entre os Estados de Pernambuco e Paraíba, cujo os resultados das amostras apontaram para diferentes estágios de intemperismo, podendo ser classificado como alítica e sialítica, obtendo índices de K_i que variam de 3,8 a 2,2, e K_r 3,0 a 1,2, sendo classificados como alítica, ferralítica e sialítica, revelando níveis de intemperismo ora mais, ora menos avançados (FONSÊCA *et al.*, 2020).

Soars (2019), por sua vez, ao estudar o tanque natural centrado no sítio Riacho Verde em Ouro Branco, Rio Grande do Norte, aplicou a técnica de FRX, possibilitando estabelecer o grau intempérico dos preenchimentos sedimentares, obtendo valores de K_i que variam entre 1,1 e 1,85 e K_r 0,96 e 0,94. A caracterização geoquímica indicou que o material intemperizado sofreu estágios distintos ao longo do perfil, e que os sedimentos das camadas mais próximas da superfície apresentam características mais recentes, no que tange a evolução geomorfológica.

Numa perspectiva geomorfológica, vários trabalhos tem adotado a (FRX) para a caracterização geoquímica de sedimentos, sua gênese e grau de intemperismo, principalmente em unidades coluviais (CRUZ, 2005; GONÇALVEZS 2018; RAMOS, 2014; FONSÊCA *et al.*, 2020; SILVA, 2016; SILVA *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2020; SARTOR, *et al.*, 2020).

Observa-se que a maioria dos trabalhos já desenvolvidos, tiveram como foco os ambientes coluvionares, onde o registro sedimentar apresenta origens diversas, devido ao carreamento, podendo ser influenciados pelas condições climáticas, ação dos ventos, precipitação, entre outros. Porém, os registros sedimentos encontrados nas Bacias do presente trabalho são de caráter *in situ*.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização sedimentológica associada a análise morfoestratigráfica relevou a sequência evolutiva dos perfis *in loco*, onde as unidades basais, sob o saprolito, apresentaram maiores concentrações de cascalho e/ou sedimentos mais grossos. As demais unidades, apesar de exibirem similaridades, muito em função da pouca espessura dos perfis, se diferenciam pela presença de matéria orgânica e, também, pela coloração. As análises geoquímicas relevaram que o sedimento é geoquimicamente pouco desenvolvido, com grandes concentrações de sílica, alumínio e ferro, óxidos em abundância nas litologias cristalinas.

O mapeamento permitiu identificar a ocorrência de Bacias de Dissolução no core da Serra da Baixa Verde, distribuídas nas cotas superiores a 700 metros de altitude, numa área que se configura como Brejo de Altitude, com condicionantes peculiares frente ao contexto regional, apresentando temperaturas mais amenas, precipitações mais elevadas, sob solos de maior profundidade, entre outros. A gênese dessas feições centradas, especificamente, nas áreas planas e nos topos da Serra, está associada ao intemperismo químico, sob condições de climas secos (semiárido e sub-úmido), sem recebimento de materiais externos.

Do ponto de vista geomorfológico, as Bacias são relevantes por estocarem sedimentos que relevam eventos episódicos, e subsidiam informações sobre a reconstrução da paisagem. Ecologicamente, são ambientes eco-hidrofísicos que sustentam e mantêm o funcionamento de diversos ecossistemas, onde há produção de matéria orgânica oriunda da deposição da vegetação aquática. No contexto social, funcionam como armazenamento de água, utilizada sobretudo na agropecuária, e em alguns casos para serviços domésticos.

Mediante o exposto, os dados confirmam que as características dos sedimentos, sua natureza química e arranjo estratigráfico são remanescentes de processos pretéritos, que apesar de fragmentados e disjuntos, atuando com intensidades distintas, fornecem informações sobre a dinâmica geomorfológica. E que a morfologia da paisagem emerge das ligações entrelaçadas entre litologia, clima, vegetação, suscetibilidade ao intemperismo, entre outros.

Também se abre a oportunidade de discussão sobre a necessidade de novas pesquisas no campo de atuação, bem como diálogos com as análises referidas ao longo do resumo.



REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. F.; CORRÊA, A. C.B., MUTZENBERG, D., MEIRA, D. A. Evolução holocênica das encostas da bacia do riacho Bruscas, Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 39, p. 112-125, 2020.
- GUTIÉRREZ, M. Climatic Geomorphology. **Elsevier Science & Technology**, 774p, 2005.
- LAN, Bo, ZHANG, Dongliang, Yang, Yunpeng. Lacustrine sediment chronology defined by ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb and the hydrological evolution of Lake Ailike during 1901–2013, northern Xinjiang, China. **Catena**, 104-112, 2018.
- LEITE; Niedja Malaquias de Castro; ARAUJO, Rosa Maria Dias; AMADOR, Maria Betânia Moreira. A presença de caldeirões na paisagem e na agropecuária de Ibirajuba – PE. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 6, 2016.
- LIMA, F. J.; PAISANI, J. C.; CORREA, A. C. B.; PONTELLI, M. E. Micromorfologia de colúvios em sequências pedoestratigráfica e litoestratigráfica – o caso das superfícies de palmas/água doce (sul) e planalto sedimentar do Araripe (Nordeste do Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, p. 329-348, 2017.
- LIMA, Kleber Carvalho; CUNHA, Cenira Maria Lupinacci da; PEREZ FILHO, Archimedes. Relações entre rede de drenagem e superfícies de aplainamento semiáridas. **Mercator, Fortaleza**, v.15, n.2, p. 91-104, 2016.
- MAIA, R.P; NASCIMENTO, M.A.L. Relevos Graníticos do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. São Paulo v.19, p.373-389, 2018.
- OLIVEIRAA, D.P. Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil, **CATENA**, 2017.
- SILVA, Danielle Gomes da; CORRÊA, Antonio Carlos de Barros; AMORIM, Rodrigo de Freitas. Caracterização morfológica e dinâmica ambiental das marmitas (weathering pit) no distrito de fazenda nova, Pernambuco - nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 2, pp. 350-362, 2017.
- SILVA, Y. J. A. B; NASCIMENTO, C. W. A; BIONDI, C. M. B; STRAATEN, P; SOUZA Jr; V. S. S; FERREIRA, T. O. Weathering rates and carbon storage along a climate sequence of soils developed from contrasting granites in northeast Brazil. **Geoderma**, v, 289, p. 1-12, 2016.
- SILVA, *et al.* Concentration of major and trace elements in soil profiles developed over granites across a climate sequence in northeastern Brazil. **CATENA**, 2020.
- SOUZA, J. O. P.; CORREA, A. C. B.; Cenários Evolutivos da Conectividade da Paisagem em ambiente semiárido – bacia do riacho do Saco, Serra Talhada, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 01, 2020.
- SILVA FILHO, J. L.; SOUZA, J. O. P. Caracterização e Classificação Morfológica de Bacias de Dissolução no Maciço Da Serra da Baixa Verde PB/PE. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 99, p. 243–256, 2024.
- SOUZA, J. J. L. L. et al. Archaeoanthrosol formation in the Brazil ian semi-arid. **CATENA**, 2020.
- SOUZA, J. E. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **CATENA**, 2019.
- TRAJKOVSKI, K. K; PETROVIC, D. G. D. Optimization of UAV Flight Missions in Steep Terrain. **Remote Sensing**, p. 01-20, 2020.
- WALDHERR, Felipe Rodrigues; ARAÚJO JÚNIOR, Hermínio Ismael de. ROD RIGUES, Sérgio Wilians de Oliveira. Origem e morfologia dos tanques naturais do Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, p. 467-488, 2017.
- WIEGAND, Mario Cesa, Piedra, GONZÁLEZ, Julio Iván, ARAÚJO, José Carlos. Vulnerability towards eutrophication of two tropical lakes in both humid (Cuba) and semi-arid (Brazil) climates. **EngSanit Ambient**, v. 21 n. 2, p. 415-424, 2016.
- ZERFASS, Henrique, ZERFASS, Geise de Santana dos Anjos. A sedimentação em uma abordagem sistêmica. **Terræ Didática**, p. 126-149, 2016.
- ZHU, M.; LIU, Z; LI, X, LIANG; S, GONG, J; ZHANG, P. Structural division of granite weathering crusts and effective reservoir evaluation in the western segment of the northern belt of Dongying Sag, Bohai Bay Basin, NE China. **Journal Pre-Poof**, 2020.



GEOMORFOLOGIA E EVOLUÇÃO DE PAISAGENS: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA ENTRE OS INSELBERGS DE CHAVAL E O MACIÇO DE URUBURETAMA (CEARÁ/BRASIL)

Júlia Stefane da Silva Vieira **1**

Mariana de Oliveira Araújo **2**

Frederico de Holanda Bastos **3**

Lionel Siame **4**

PALAVRAS-CHAVE: Inselbergs; Bacias de dissolução; Gnammas; Granito Chaval; Maciço de Uburetama.

RESUMO

O presente trabalho objetiva realizar uma análise comparativa das formas graníticas dos inselbergs de Chaval e do Maciço de Uburetama, localizados no norte da Província Borborema, no estado do Ceará, com foco nas características geomorfológicas e nos processos de formação do relevo. A pesquisa buscou compreender a evolução geomorfológica dessas duas regiões, considerando os efeitos do intemperismo, da tectônica e da dinâmica da erosão. A metodologia utilizada combina revisão bibliográfica sobre a Província Borborema com observações de campo realizadas nas duas áreas de estudo. Os inselbergs de Chaval, situados na zona norte da Província Borborema, apresentam uma morfologia dominada por gnammas e feições de dissolução, formadas por intemperismo físico e químico, que ocorrem em razão da ação de fraturas tectônicas. A análise das fraturas presentes nas áreas de estudo indica que estas têm origem tectônica, pois sua disposição e orientação estão alinhadas com as principais estruturas geológicas da Província Borborema, associadas a eventos tectônicos regionais. Além disso, a presença de falhamentos e dobramentos em regiões vizinhas reforça a hipótese de que essas fraturas resultaram de processos estruturais que moldaram o relevo local. O clima semiárido tropical da região, caracterizado por altas temperaturas e baixos índices pluviométricos, potencializa a ação erosiva, intensificando os processos de intemperismo e resultando na formação de inselbergs dômicos e flared slopes. Já o Maciço de Uburetama apresenta uma configuração estrutural mais complexa, com falhamentos e dobramentos que contribuem para uma maior variação do relevo, sendo influenciado por um contexto tectônico mais dinâmico. A interação entre os processos tectônicos e a erosão superficial resulta em uma diversidade de formas

1 Doutoranda em Geografia pelo Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campus I, João Pessoa-PB, julia.vieira@academico.ufpb.br

2 Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Ceará - UECE, oliveira.araujo@aluno.uece.br

3 Professor Adjunto do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Ceará - UECE, fred.holanda@uece.br

4 Prof. Dr. Lionel Siame – Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, França. siame@cerege.fr



geomorfológicas, com formas de relevo mais elaboradas e variadas, como inselbergs mais complexos. A pesquisa preliminar sugeriu que, embora ambos os locais apresentem processos de intemperismo e erosão, o Maciço de Uburetama se destaca por sua maior complexidade estrutural e pela atuação mais intensa das fraturas tectônicas, favorecendo a formação de um relevo mais diversificado. Por outro lado, os inselbergs de Chaval são marcados por uma modelagem mais simples, com feições predominantemente de dissolução e formação de gnammas. A análise comparativa entre os dois locais indica que os fatores geológicos, climáticos e tectônicos desempenham um papel crucial na formação do relevo, moldando as paisagens de maneira distinta, mas interconectada. A interação entre o clima semiárido e a estrutura tectônica nas duas regiões é fundamental para o entendimento dos processos geomorfológicos que caracterizam a Província Borborema, destacando a influência dos processos tectônicos e climáticos na formação e evolução do relevo dessas áreas. A pesquisa contribui para a compreensão dos mecanismos geomorfológicos presentes no contexto geológico da Província Borborema e seus impactos nas paisagens da região.

INTRODUÇÃO

A ciência geomorfológica objetiva compreender a formação e a modelação das formas de relevo através da atuação dos processos endógenos e exógenos (CHRISTOFOLETI, 1980) ao longo do tempo geológico. A compreensão desses processos é necessária para analisar as dinâmicas específicas que ocorrem em diferentes contextos ambientais. Nesse contexto, a dinâmica geomorfológica observada em ambientes tropicais semiáridos, como o Nordeste Setentrional do Brasil, resulta da interação entre fatores geológicos, climáticos e morfodinâmicos que, ao longo do tempo, moldam formas de relevo singulares.

As paisagens do Nordeste Setentrional são caracterizadas por relevos residuais proeminentes, comumente associados a *inselbergs* graníticos, que testemunham a longa atuação de processos erosivos e de intemperismo em contextos de estabilidade estrutural. Essa configuração tem sido tradicionalmente interpretada como produto de ciclos sucessivos de aplainamento, responsáveis por reorganizar e redesenhar o relevo em diferentes escalas espaciais e temporais (COSTA et al., 2020).

As unidades geológicas predominantes na região compreendem formações cristalinas compostas por granitos, gnaiesses e migmatitos. A resistência diferencial dessas rochas frente aos processos denudacionais favorece a geração de formas típicas como cristas, domos e blocos residuais, além de feições menores formadas por intemperismo localizado, como as *gnammas*. Essas cavidades subcirculares e rasas desenvolvem-se principalmente em superfícies graníticas expostas, onde a água da chuva pode se acumular temporariamente, intensificando o intemperismo químico e contribuindo para sua expansão progressiva.

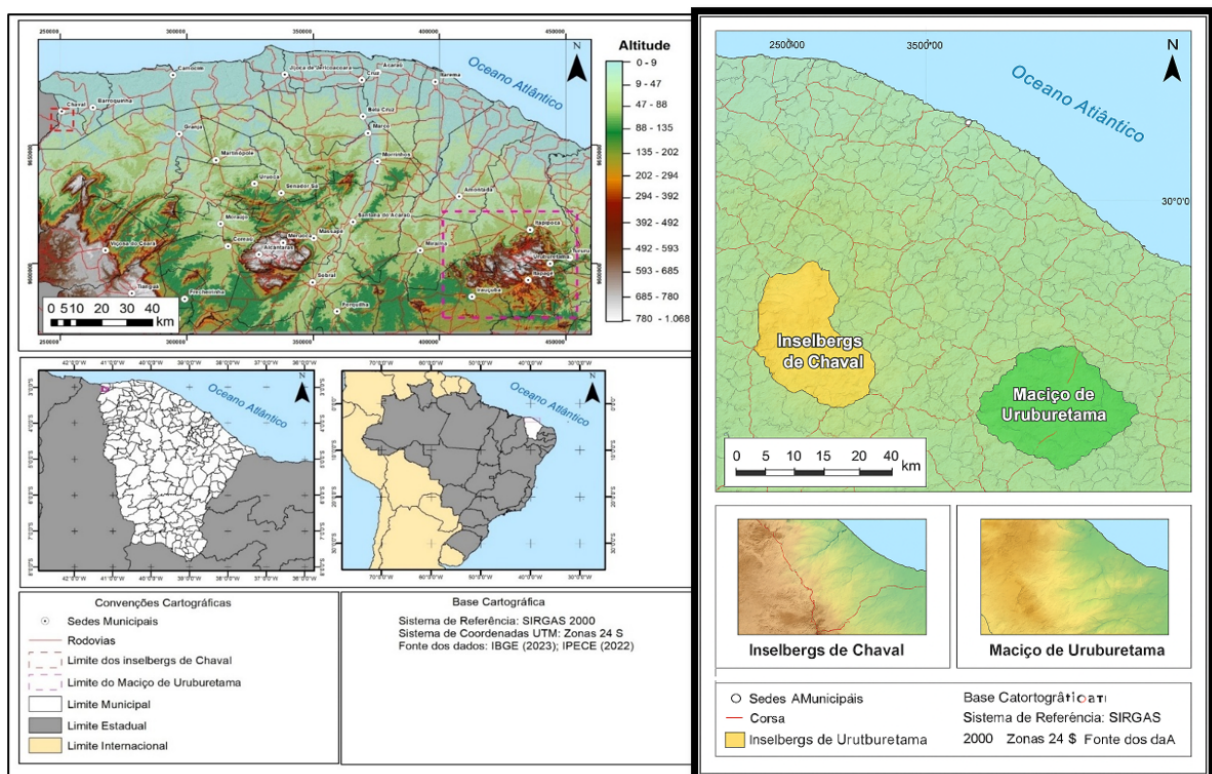


Apesar da existência de diversos estudos voltados para processos de intemperismo e formas associadas, ainda são relativamente poucos os trabalhos que analisam de maneira integrada a geomorfologia de *inselbergs* em regiões semiáridas com geologia e clima tão particulares como os do Nordeste Setentrional (ALBUQUERQUE et al., 2024). Nesse sentido, investigar essas áreas que exemplifiquem essas condições permitem a compreensão mais abrangente da gênese e evolução dessas formas residuais.

É nesse contexto que se inserem os relevos graníticos de Chaval e o Maciço de Uruburetama, ambos localizados no norte do Ceará (ver Figura 1). Essas áreas apresentam características geomorfológicas e estruturais distintas, o que as torna especialmente relevantes para a investigação comparativa dos processos formadores de paisagens em ambientes cristalinos semiáridos.

O presente estudo tem como objetivo analisar comparativamente os *inselbergs* graníticos do Batólito de Chaval e as macroformas e microformas do Maciço de Uruburetama, ambos situados no norte do estado do Ceará, com ênfase na compreensão dos mecanismos geomorfológicos responsáveis por sua evolução. A partir de uma abordagem que integra dados geológicos, morfológicos e climáticos, buscou-se compreender os processos que condicionam a formação dessas feições e a evolução geral do relevo, contribuindo para o entendimento da paisagem semiárida nordestina e de sua dinâmica ao longo do tempo.

FIGURA 1 – Localização da Área de Estudo



FONTE: Elaborado pelos autores (2025).



METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se em procedimentos comparativos e integrados de análise geomorfológica, com ênfase na descrição morfoestrutural e nos processos de evolução das formas graníticas que compõem os inselbergs do Batólito de Chaval e o Maciço de Uruburetama, ambos situados na porção norte da Província Borborema, no estado do Ceará.

A pesquisa envolveu revisão bibliográfica, organização de bases cartográficas e imagens, atividades de campo para observação e registro do relevo, integração dos dados em ambiente de geoprocessamento e, por fim, análise e discussão dos resultados à luz da literatura especializada.

Foi realizado trabalho de campo nos dois domínios estruturais (Maciço de Uruburetama e Batólito Chaval) objetivando identificar feições geomorfológicas (inselbergs, lajedos, flared slopes, gnammas e boulders), além de observar padrões de fraturamento e disposição estrutural das rochas. Essas observações possibilitaram a análise das formas do relevo e suas relações com as estruturas litológicas e tectônicas locais.

Posteriormente, na etapa de gabinete, foram realizados levantamentos bibliográficos e cartográficos. O levantamento bibliográfico teve ênfase na literatura especializada em geomorfologia granítica, morfogênese em ambientes cristalinos e evolução de paisagens em terrenos arqueanos e proterozoicos. Foram consultados artigos científicos, dissertações, teses, mapas geológicos e geomorfológicos oficiais (GSB/CPRM e IBGE), objetivando de compreender o contexto geotectônico e os aspectos morfológicos gerais das duas áreas estudadas.

A etapa final consistiu na análise comparativa das duas unidades morfoestruturais, considerando a relação entre litologia, tectonismo e morfologia, além das observações feita em campo. Também realizou-se a interpretação da evolução paisagística em função dos mecanismos de erosão, intemperismo e exumação.

Nessa perspectiva, essa abordagem possibilitou a identificação de semelhanças e contrastes na evolução geomorfológica das duas áreas, contribuindo para a compreensão dos fatores que condicionam a diversidade de formas graníticas na Província Borborema Setentrional.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Unidades Geológicas e Estruturais do Nordeste Setentrional

A geologia do Nordeste Setentrional registra uma história geodinâmica complexa, iniciada no Pré-Cambriano, caracterizada pela predominância de rochas cristalinas associadas ao embasamento antigo do Cráton do São Francisco e às faixas móveis circunjacentes, como a Faixa Seridó e a Faixa Riacho do Pontal. Essa região é composta majoritariamente por litotipos

como granitos, gnaisses, migmatitos, quartzitos e anfibolitos, os quais foram intensamente metamorizados e deformados durante os eventos tectono-metamórficos do Ciclo Brasileiro, ocorridos entre aproximadamente 700 e 500 milhões de anos (ARTHAUD et al, 2004).

As unidades litológicas presentes resultam da colisão continental entre blocos paleocontinentais durante o Neoproterozoico, que consolidaram o embasamento do Nordeste. Dentre os principais domínios estruturais destacam-se o Domínio Rio Piranhas-Seridó, o Domínio Pernambuco-Alagoas e o Domínio Médio Coreauá, que apresentam conjuntos de cinturões metamórficos, zonas de cisalhamento dúctil-frágil e intrusões graníticas de diversas idades.

Os processos de denudação, associados a longos períodos de estabilidade tectônica, permitiram o aplainamento progressivo do relevo, processo intensificado por pulsos cenozoicos de soerguimento e retrabalhamento erosivo (MAIA e BEZERRA, 2014). Essa dinâmica foi essencial para a reativação de falhas antigas, o rejuvenescimento de compartimentos estruturais e a formação de feições geomorfológicas marcantes como inselbergs, cuevas, relevos do tipo *bornhardts* e frentes escarpadas.

Estudos recentes (COSTA et al., 2020) apontam que os ciclos denudacionais sucessivos contribuíram não apenas para a dissecação das estruturas rochosas, mas também para a reorganização do sistema de drenagem e para o desenvolvimento de coberturas lateríticas, depósitos eluviais e coluviais. Esses produtos de intemperismo representam registros importantes dos climas passados e das alterações da superfície continental.

Além disso, o embasamento pré-cambriano se encontra, em muitos trechos, recoberto ou em contato tectônico com sedimentos fanerozoicos pertencentes às bacias interiores (como a Bacia do Parnaíba, a Bacia do Jatobá e a Bacia do Tucano) e às bacias marginais atlânticas (como a Bacia Potiguar e a Bacia Pernambuco-Paraíba). Esses contextos sedimentares incluem depósitos fluviais, lacustres e eólicos, que contribuem para a heterogeneidade geológica e para a complexidade dos padrões estruturais da região.



As zonas de cisalhamento, como a Zona Transcorrente de Pernambuco, desempenharam papel fundamental na compartimentação do território, funcionando como condutores de deformação e como controles estruturais para a formação de bacias e alinhamentos de drenagens. A reativação dessas estruturas ao longo do Cenozóico influenciou diretamente a evolução geomorfológica, condicionando frentes de montanha, vales assimétricos e a distribuição de falhamentos normais ou transcorrentes que ainda apresentam sinais de atividade tectônica neotectônica.

Nesse contexto, a paisagem atual do Nordeste Setentrional é o resultado da interação entre heranças tectônicas e processos exógenos prolongados, que modelaram uma morfologia diversificada e, muitas vezes, controlada por estruturas geológicas profundas (MAIA et al, 2015).

1.1 Granito de Chaval

O Granito de Chaval, situado no estado do Ceará e pertencente ao Grupo Chaval, é uma unidade geológica datada do Ediacardiano ($\sim 591 \pm 10$ Ma) composta principalmente por feldspatos, quartzo e micas. Essa formação granítica é uma das mais representativas da região, destacando-se pela sua resistência à erosão, o que resulta na formação de morros graníticos e relevos residuais (GORAYEB et al, 1995).

A principal característica desse granito é a sua alta dureza, o que favorece a preservação das elevações graníticas em comparação com as rochas sedimentares ou metamórficas ao redor. Em termos litoestruturais, o Granito Chaval corresponde a um batólito que aflora próximo à costa atlântica entre os estados do Ceará e Piauí, intrudindo ortognaisses do Complexo Granja e supracrustais do Grupo Matinópolis. Sua textura porfirítica é uma característica marcante, conferindo maior resistência aos processos intempéricos e favorecendo a atuação da erosão diferencial (GORAYEB; LIMA, 2014).

Conforme apontado por Cordeiro et al. (2023), a ação denudacional cenozoica sobre o Batólito Chaval resultou na formação de um conjunto expressivo de relevos residuais, compondo o campo de inselbergs de Chaval, localizado no trecho inferior da bacia hidrográfica do rio Timonha, em ambiente estuarino.

Essa paisagem apresenta uma rica diversidade de macro e microformas graníticas, destacando-se os inselbergs dômicos, com alturas superiores a 30 metros, que exibem feições de dissolução, como gnammas, com dimensões que podem ultrapassar dezenas de metros. A Figura 2 ilustra os inselbergs do Batólito Chaval.



FIGURA 2 – Inselbergs exumados em Chaval - CE



FONTE: Acervo pessoal (2025).

As gnammas são cavidades subcirculares, rasas e bem delimitadas, geralmente desenvolvidas em áreas de topo ou superfícies graníticas planas, onde a água pluvial tende a se acumular de forma recorrente. Essa estagnação hídrica favorece o intemperismo químico localizado, promovendo a dissolução dos minerais feldspáticos e a formação de produtos secundários como argilas.

Segundo Bigarella et al. (1994), no semiárido brasileiro, essas tendem a se desenvolver preferencialmente em zonas de fraqueza estrutural, como fraturas e diaclases. Sua evolução é frequentemente intensificada por agentes biológicos, incluindo organismos inferiores, musgos e líquens, que promovem a acidificação local do substrato.

No caso específico do Granito de Chaval, a morfologia das gnammas está diretamente associada à estrutura do corpo granítico e à atuação prolongada de processos intempéricos sazonais, com alternância de períodos secos e chuvosos, típicos do clima tropical semiárido. Nesse sentido, na área de estudo, as gnammas observadas (Figura 3) apresentam diferentes estágios evolutivos, no qual indica uma dinâmica ativa de formação e ampliação. A dinâmica geomorfológica do Granito de Chaval é marcada por processos de intemperismo físico e químico que atuam conjuntamente.



FIGURA 3 – Gnammas expostas no topo dos inselbergs



FONTE: Acervo pessoal (2025).

O intemperismo físico, causado por variações térmicas acentuadas e pela abrasão eólica, provoca a fragmentação das rochas, gerando grandes blocos e superfícies esfoliadas (PENTEADO, 1983). Em alguns trechos, observa-se a ocorrência de esfoliação esferoidal, evidenciada pelo descolamento progressivo das camadas externas da rocha, que resulta em formas arredondadas e superfícies suaves.

Já o intemperismo químico, dominado pela hidrólise, transforma minerais primários em argilas e óxidos, contribuindo para a formação de solos lateríticos e concreções ferruginosas (lateritas) em áreas de maior decomposição. Além das gnammas, o processo de tafonização também é recorrente nas superfícies graníticas de Chaval, resultando em feições como tafonis, cavidades alveolares e saliências. Embora a gênese dessas formas ainda seja objeto de debate, muitos autores defendem uma origem poligênica, condicionada por fatores estruturais, climáticos e biológicos (MAIA et al., 2022).

Essas cavidades se desenvolvem preferencialmente ao longo de planos de fratura, falhas e superfícies de foliação, onde a infiltração de água acelera a dissolução química e favorece a expansão do processo. De acordo com Maia et al. (2022), essas discontinuidades



litológicas criam o ambiente propício para o avanço da tafonização, que, embora distinta das gnammas em termos de morfologia e localização, compartilha com elas a dependência da interação entre estrutura geológica e intemperismo localizado.

1.2 Maciço de Uruburetama

O Maciço de Uruburetama, composto principalmente por gnaisses e migmatitos do Pré-Cambriano, é uma unidade geológica de grande relevância na região norte do estado do Ceará, marcada por uma forte relação entre estrutura geológica e morfologia superficial. Seu relevo apresenta um modelado fortemente dissecado, com cotas altimétricas que variam entre 500 e 800 metros, podendo alcançar até 1.000 metros (Lima et al., 2019). O gnaisse é uma rocha metamórfica derivada da recristalização de granitos sob condições de altas pressões e temperaturas, enquanto o migmatito resulta de fusão parcial de rochas graníticas, caracterizando-se por uma textura heterogênea com bandas claras e escuras intercaladas. Essas litologias são marcadas por uma forte foliação, que influencia diretamente os padrões de fraturamento, a drenagem superficial e a evolução morfológica do maciço.

FIGURA 4 – Padrões de faturamento presentes no Maciço de Uburetama



FONTE: Acervo pessoal (2025).



Segundo Angelim et al. (2003) e Fetter et al. (2003), o Maciço de Uruburetama é constituído por granitoides neoproterozoicos da Suíte Intrusiva Tamboril–Santa Quitéria, datados do Criogeniano (~650 Ma), cuja evolução está associada à deformação compressiva em um provável ambiente de arco magmático. O corpo granítico apresenta-se intensamente fraturado e dissecado, com a presença de cristas alongadas intercaladas com vales em “V” e pequenas planícies alveolares.

FIGURA 5 – Vista do Maciço de Uburetama: Setor sotavento Irauçuba/CE



FONTE: Acervo pessoal (2025).

Essa configuração favorece o desenvolvimento de formas residuais bem marcadas, atribuídas à resistência relativa dos granitoides em contraste com rochas metamórficas adjacentes de menor resistência, como xistos e filitos. Assim, o relevo é dominado por escarpas íngremes e morros proeminentes, onde os ressaltos topográficos são formados pelas camadas mais resistentes de gnaiss (LIMA et al., 2019).

A dinâmica morfogenética do Maciço de Uruburetama reflete a atuação conjunta da erosão diferencial, da dissecação fluvial e do intemperismo químico e físico. Em altitudes mais elevadas, a exposição prolongada das rochas promove a intensificação de processos de decomposição superficial e de esculturação do relevo, favorecendo a formação de formas como bornhardts, tors, blocos graníticos isolados (boulders),



alvéolos e superfícies esfoliadas (LIMA, 2018). Nesses locais, as condições ambientais, aliadas à estrutura litoestrutural e à ação do escoamento superficial intermitente, contribuem para a instalação e evolução de microformas de dissolução.

Entre essas microformas, destacam-se as gnammas, que, embora mais associadas a litologias graníticas, também podem se desenvolver em superfícies metamórficas com graus variados de alteração, especialmente em contextos com acúmulo intermitente de água e presença de planos de fraqueza bem definidos. No Maciço de Uruburetama, as gnammas tendem a se formar nas superfícies planas e mais elevadas, onde a ação da água da chuva acumulada em pequenas bacias fechadas, somada ao intemperismo químico localizado, favorece a dissolução diferencial dos minerais, particularmente os feldspatos residuais presentes em lentes graníticas migmatíticas. As feições identificadas variam desde pequenas concavidades circulares com alguns centímetros até depressões com decímetros de largura, muitas vezes parcialmente preenchidas por material argiloso e produtos de alteração.

Essas cavidades são interpretadas como resultado da combinação entre a estrutura litológica (fraturas, foliações e zonas de cisalhamento) e as condições microambientais de intemperismo, incluindo a ação de líquens e musgos, que promovem a acidificação local. Assim como em Chaval, as gnammas em Uruburetama são indicativas da atuação prolongada de intemperismo químico em superfícies expostas e relativamente planas, e sua distribuição tende a acompanhar zonas de drenagem difusa, próximas aos topos de morros residuais. A gênese dessas formas é, portanto, condicionada tanto por fatores estruturais quanto climáticos, refletindo um regime morfogenético ativo mesmo em contextos semiáridos, onde os ciclos de umidade e seca exercem papel fundamental na modificação das formas superficiais.

Além das gnammas, o processo de tafonização também é comum nas superfícies rochosas mais expostas do maciço, formando tafonis e outras cavidades alveolares, cuja gênese também está vinculada à atuação combinada do intemperismo físico e químico. As variações altimétricas no interior do maciço, que vão de 300 a 900 metros, são um dos principais condicionantes para a diferenciação espacial dos processos de intemperismo, sendo que as áreas mais elevadas tendem a apresentar maior intensidade de processos erosivos, enquanto nas cotas mais baixas a decomposição superficial é mais visível.



Tafonização e Gênese de Gnammas em Áreas Graníticas do Nordeste Setentrional do Brasil: Uma Análise Comparativa com Regiões Áridas e Úmidas no Mundo

O termo *tafoni* (plural de *tafone*) refere-se a cavidades ou ocos formados por meteorização localizada em superfícies rochosas íngremes (ALLABY, 2013). Essas formações são resultado do intemperismo cavernoso e geralmente apresentam dimensões que podem alcançar vários metros cúbicos, com entradas comumente arqueadas (Goudie, 2003). Internamente, estruturas alveolares ou com padrão de “*honeycomb*” (favo de mel) são frequentemente observadas, sendo descritas por Mustoe (1982) e Vidal-Romaní e Yepes Terminiño (2004).

A tafonização é um processo geomorfológico que resulta na formação de cavidades e superfícies de desgaste localizado em rochas expostas, especialmente graníticas, por meio da combinação de intemperismo físico e químico. Embora amplamente associada a ambientes áridos e semiáridos, também ocorre em regiões tropicais úmidas, como o Nordeste Setentrional do Brasil. Nesse contexto, a formação de tafonis é favorecida por fraturas e descontinuidades estruturais nas rochas, ciclos de umidade e secagem, variações térmicas entre o dia e a noite, e reações químicas como a hidrólise e a oxidação (Maia et al., 2022). Durante os períodos chuvosos, a infiltração de água intensifica a decomposição mineral, especialmente de feldspatos e micas, enquanto nos períodos secos a contração térmica e a evaporação acentuam o deslocamento superficial e ampliam as cavidades.

Além das tafonis, as gnammas representam outro tipo recorrente de feição erosiva em superfícies graníticas, observadas com frequência em unidades como o Granito de Chaval, o Maciço de Uruburetama e a Serra da Meruoca. As gnammas são cavidades rasas, subcirculares e bem delimitadas, que se formam pela estagnação da água da chuva em superfícies planas ou ligeiramente inclinadas (Júnior, 2022). Essa permanência temporária de água intensifica o intemperismo químico localizado, especialmente a hidrólise, levando à dissolução progressiva dos minerais primários e à formação de material argiloso (DYKE, 2009). Como apontado por

Bigarella et al. (1994), tais feições estão comumente associadas a zonas de fratura ou diaclases e podem ser potencializadas pela ação biológica de líquens, musgos e algas, que acidificam o microambiente e promovem a degradação mineral.

Ambas as feições (tafonis e gnammas) ocorrem preferencialmente em ambientes com litologias resistentes à erosão, mas com descontinuidades estruturais bem desenvolvidas, como os granitos e migmatitos do Nordeste setentrional. A coexistência dessas formas em uma mesma paisagem aponta para a complexidade dos processos intempéricos na região,



onde os fatores climáticos (como oscilação térmica, umidade relativa e sazonalidade hídrica) e os fatores litológicos e estruturais (fraturas, textura mineral, resistência diferencial) interagem de maneira eficaz na esculturação do relevo granítico.

Comparando com outras regiões do mundo, observa-se que a tafonização é comum em ambientes áridos e semiáridos como o Deserto do Atacama (Chile), o Deserto de Sonora (EUA/México) e o Deserto de Kalahari (África), onde a baixa umidade, a intensa radiação solar e a alta amplitude térmica favorecem o desenvolvimento de cavidades. Já a formação de gnammas também é relatada em regiões tropicais úmidas, como certas áreas da África Central, Madagascar e Austrália, onde a permanência da água sobre superfícies rochosas durante longos períodos promove intensa alteração química.

No Nordeste Setentrional do Brasil, embora as condições climáticas não sejam tipicamente áridas, a ocorrência de ciclos alternados de seca e chuva, combinados com a alta amplitude térmica diária e a estrutura litológica favorável, permite o desenvolvimento paralelo de tafonis e gnammas em uma mesma unidade geomorfológica. Isso demonstra que tais feições não são exclusivas de zonas desérticas ou temperadas, mas podem ocorrer em ambientes tropicais com regimes hidrotérmicos contrastantes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, este estudo buscou evidenciar que a paisagem analisada é fruto de uma complexa interação entre processos de intemperismo físico e químico, associados à erosão diferencial. A atuação conjunta de fatores estruturais e de condições ambientais locais, sobretudo o clima tropical semiárido com alternância de períodos secos e chuvosos, contribui para a configuração de um relevo singular.

Trata-se, portanto, de uma dinâmica morfogenética que reflete a influência integrada de aspectos geológicos e climáticos na modelagem de formas residuais expressivas e distintas no contexto do Nordeste Setentrional. As unidades geológicas dominantes, como o Granito de Chaval, o Maciço de Uruburetama, apresentam uma rica diversidade de formações graníticas e metamórficas que refletem a longa história tectônica e evolutiva da região. O Granito de Chaval, em particular, destaca-se pela resistência à erosão, resultando em morros graníticos e relevos residuais, evidenciados pelos inselbergs dômicos e os processos de tafonização.

O estudo de processos de tafonização, como observado no Granito de Chaval e em outras áreas da região, permite uma compreensão mais aprofundada de como as características das rochas e a interação com o clima local favorecem a formação de cavidades nas superfícies rochosas, alterando ainda mais o relevo.



No Maciço de Uruburetama, a erosão diferencial entre gnaisses, migmatitos e outras rochas metamórficas gera um relevo acidentado, com escarpas e morros, enquanto a tafonização ocorre em regiões mais expostas, formando tafonis nas rochas graníticas. A interação entre processos erosivos e tectônicos intensifica a complexidade da morfologia local, com destaque para as cristas alongadas e as áreas de vales em “V” que caracterizam o relevo da região. A esculturação do relevo também é influenciada pelas variações altimétricas, que criam um cenário dinâmico de desgastes e deposições, promovendo uma variabilidade de formas geomorfológicas.

A análise dos processos geomorfológicos e da dinâmica do relevo granítico revela que, além da erosão diferencial e da tafonização, outros fatores, como a laterização e a esculturação tectônica, desempenham papéis essenciais na modelagem do relevo. A laterização, por exemplo, é um processo que resulta na formação de solos ricos em ferro e alumínio, comuns nas áreas com maior decomposição rochosa. A combinação desses processos com o intemperismo físico e químico, particularmente a hidrólise e a oxidação, favorece a formação de solos pedregosos e lateríticos, que caracterizam grande parte da paisagem da região.

Além disso, a comparação entre os processos de tafonização no Nordeste Setentrional e em outras regiões do mundo, como desertos áridos, mostra que a tafonização pode ocorrer também em climas tropicais e úmidos, como os do Nordeste Setentrional do Brasil, desafiando as concepções tradicionais sobre as condições necessárias para a formação de tafonis. A alternância entre períodos úmidos e secos, a variação térmica diurna e a alta umidade atmosférica criam um ambiente favorável para a dissolução química e a fragmentação física das rochas, acelerando o processo de tafonização e gerando formas geomorfológicas complexas.

Em síntese, este estudo contribui para o entendimento das interações entre os processos geológicos e geomorfológicos que moldam a paisagem do Nordeste Setentrional do Brasil. A análise das unidades cristalinas e dos relevos graníticos oferece uma visão abrangente dos mecanismos que governam a formação e a evolução do relevo na região, evidenciando a importância dos processos de intemperismo, erosão e tafonização na modelagem do ambiente.



REFERÊNCIAS

- ALLABY, M.A **Dictionary of geology and Earth sciences**. 4th revised ed. New York: Oxford University Press. Inc. 2013. 672 p.
- ALBUQUERQUE, D. S.; XAVIER, R. X.; SUERTEGARAY, D. M. A. Compartimentação Geomorfológica do Maciço do Pereiro e entorno, Nordeste Setentrional do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 3, 2024.
- ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. Paiva; SANTOS, E. J. Geotectônica do Escudo Atlântico: Província Borborema. p. 264-281. In: BIZZI, Luiz Augusto; SCHOBENHAUS, Carlos; VIDOTTI, Roberta Mary; GONÇALVES, João Henrique (Ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: textos, mapas & SIG**. Brasília: CPRM –Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692p.
- ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R. A., DANTAS, E. L.; PARENTE, C. V. **Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa**. In: PANKHURST, R. J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B.; WIT, M. J. (Eds.). West Gondwana Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region. Geological society, v. 294, p. 49-67, 2008.
- BASTOS, F. H.; CORDEIRO., Abner M. N. Fatores naturais na evolução das paisagens no semiárido brasileiro: uma abordagem geral. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 5, p. 464–476-464–476, 2012.
- BIGARELLA, J. J. et al. **Estrutura e Origem das Paisagens tropicais e Subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, Volume 1. 1994, 426p.
- CHRISTOFOLETI, Antônio. **Geomorfologia**. São Paulo, Edgard Blücher, 2ª edição, 1980.
- CORDEIRO, Abner Monteiro Nunes et al. Geomorfologia do Campo de Inselbergs de Chaval, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 1, 2023.
- COSTA, L. R. F.; MAIA, R. P.; BARRETO, L. L.; SALES, V. C. C. Geomorfologia do Nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, n. 1, jan./mar. p. 185-208, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1447>.
- DYKE, A. S. A186-188 (1): A line of 5 tors developed in coarse grained granitic rock of the Cumberland Batholith east of Pangnirtung (66.11 N, 65.549 W). The tors are separated by weathering along near vertical joints. Note large weathering pits (gnammas) on tor tops. 2009.
- FETTER, Allen H. et al. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of west Gondwana. **Gondwana Research**, v. 6, n. 2, p. 265-273, 2003.
- GORAYEB P.S.S., ABREU, F.A.M., MOURA C.A.V. Geração de corpos graníticos batolíticos sintransamazônicos na Província Borborema: O exemplo do Granitóide Chaval. In: SBG-NE, **Simpósio de Geologia do Nordeste**, 16, Recife, Atas 14:414-417. 1995.
- GORAYEB, P. S. S.; LIMA, A. M. M. Aspectos texturais do magmatismo e tramas da tectônica impostas ao Granito Chaval na Zona de Cisalhamento Santa Rosa, extremo Noroeste da Província Borborema. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, p. 653-668, 2014.
- GOUDIE, A. S.(ed) **Encyclopedia of geomorphology**. Volume 1. London and New York: Routledge, 2003. 578 p.
- GOUDIE, Andrew S. Quantification of rock control in geomorphology. **Earth-Science Reviews**, v. 159, p. 374-387, 2016.
- JUNIOR, J. C. S. Caneluras e bacias de dissolução no Parque Estadual da Pedra da Boca, Paraíba (Brasil) / Karren and gnamms in an inselberg of the State Park Pedra da Boca, Paraíba (Brazil). **William Morris Davis – Revista de Geomorfologia**, v. 3, n. 2, 2022.
- LIMA, D. L. Geomorfologia em estruturas graníticas: o caso do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. 258f. **Dissertação (Mestrado em Geografia)** -Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, 2018
- LIMA, D. L. S. et al. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, 2019.
- MAIA, R. P.; B., F. HR. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. **Mercator (Fortaleza)**, v. 13, p. 127-141, 2014.



- MAIA, R. P. et al. Breves considerações sobre Tafoni em inselbergs: aspectos genéticos e morfoestruturais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1792-1811, 2022.
- MAIA, Rúbson Pinheiro; BEZERRA, Francisco Hilário Rêgo; NASCIMENTO, Marcos Antônio Leite; DE CASTRO, Henrique Sampaio; MEIRELES, Antônio Jeovah de Andrade; ROTHIS, Luis Martin. GEOMORFOLOGIA DO CAMPO DE INSELBERGUES DE QUIXADÁ, NORDESTE DO BRASIL. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i2.651. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/651>. Acesso em: 2 jul. 2025.
- MUSTOE, G. E. The origin of honeycomb weathering. **Geological Society of America Bulletin**, v. 93. 1982. p. 108-115
- PENTEADO, Margarida Maria. **Fundamentos de Geomorfologia**. 3ª ed., 2ª tiragem – Rio de Janeiro: IBGE, 1983.
- PEREIRA, P.; PEREIRA, D. Í.; ALVES, M. I. Particularidades da morfologia granítica da Serra de Gamoneda-Montesinho (Espanha-Portugal). **Actas do X Colóquio Ibérico de Geografia, Universidade de Évora, CD-Rom**, 2005.
- ROTHIS, Luis Martin. GEOMORFOLOGIA DO CAMPO DE INSELBERGUES DE QUIXADÁ, NORDESTE DO BRASIL. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i2.651. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/651>. Acesso em: 2 jul. 2025.
- SOUZA, M. J. N. Contribuição ao estudo das unidades morfo-estruturais do estado do Ceará. **Revista de geologia**, v. 1, n. 1, p. 73-91, 1988.
- VIDAL-ROMANÍ, J. R.; YEPETERMIÑO, J. Historia de la morfogénesis granítica. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, n. 29, p. 331-360, 2004
- XAVIER, R. A. Processos geomorfológicos e evolução da paisagem no semiárido brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 59-69, 2021.



TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS EM SOLOS FERRALÍTICOS DESENVOLVIDOS SOBRE PALEO SUPERFÍCIES NA REGIÃO DA SERRA DA CANASTRA (MG)

Diego Fernandes Terra Machado ¹
Mayra Mac Alpine ²
Francisco Sergio Bernardes Ladeira ³

PALAVRAS-CHAVE: Latossolização, Micromorfologia, Microestrutura.

RESUMO

Na região da Serra da Canastra, solos ferralíticos desenvolvidos a partir de depósitos detrito-lateríticos e de rochas metamórficas, ocorrem em paleo superfícies preservadas nas porções cimeiras do relevo, acima de 100 m de altitude, atuando como registros pedológicos de antigos ciclos morfoclimáticos. Ao longo do tempo, processos como o intemperismo químico, bioturbação e a dinâmica hidrológica atuam na formação e transformação dos solos. A literatura destaca a importância da bioturbação como um dos principais agentes responsáveis pela homogeneização dos solos tropicais, pela formação de microestruturas típicas, como as observadas nos Latossolos e, até mesmo, a degradação de *duricrusts* ferruginosos. Neste estudo, buscou-se avaliar microfieções associadas aos processos formadores dos microagregados em solos da região. Foram coletadas amostras indeformadas de horizontes superficiais e subsuperficiais para impregnação e confecção de lâminas delgadas, destinadas a análise micromorfológica. As características desses solos refletem um processo de latossolização em curso, envolvendo tanto a ferralitização (moderada a intensa) quanto a bioturbação. Nos Latossolos, o que se observa é a transformação progressiva de estruturas grandes na forma de blocos, em estruturas microagregadas granulares, mais comuns nos horizontes superficiais. Como esperado, grande parte dos vestígios biológicos se concentra nos horizontes mais próximos da superfície, onde o aporte de material orgânico é mais intenso. No entanto, excrementos são amplamente distribuídos ao longo do perfil, sendo registrados até 550 cm de profundidade. Evidências da atividade biológica não se restringe a horizontes friáveis, sendo também observada em horizontes plínticos e concrecionários de Plintossolos. Nestes, a bioturbação é mais evidente nas porções menos endurecidas, mas, em alguns casos, foi possível observar o desmantelamento de nódulos ferruginosos pela ação de organismos do solo. Quanto a gênese dos microagregados, pode-se atribuir à pelo menos, duas vias formativas: processos físico-químicos e mecanismos ligados à bioturbação, atuando de forma concomitante na organização estrutural desses solos.

- ¹ Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas - SP, diegoftmachado@gmail.com
- ² Mestranda em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas - SP, mayralpine@gmail.com
- ³ Prof. Dr. no Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas - SP, ladeira@unicamp.br



INTRODUÇÃO

As superfícies cimeiras do Planalto Central Brasileiro, situadas entre 900 e 1200 metros de altitude, correspondem a remanescentes de um expressivo ciclo de aplainamento denominado ciclo Sul-Americano, identificado por King (1956) como Superfície Sul-Americana. Esses compartimentos elevados da paisagem representam áreas marcadas por intensos processos de intemperismo que culminaram na formação de espessos perfis de alteração e solos profundamente desenvolvidos. Nesses contextos, predominam Latossolos desenvolvidos sobre distintas litologias, frequentemente associados à presença de nódulos e concreções ferruginosas, descritos por King (1956) como “detritos vermelhos”, além de horizontes endurecidos (petroplínticos ou litoplínticos), e, em determinadas condições, Plintossolos também podem estar presentes (Motta *et al.*, 2002; Rosolem *et al.*, 2017; Marques, 2021).

No centro-oeste de Minas Gerais, as Serras e Patamares da Canastra representam uma expressão dessa superfície, situando-se acima de 1000 metros de altitude. A paisagem atual resulta de uma longa história de agradação e denudação, moldada pela atuação de processos estruturais e pelo controle exercido pelo substrato rochoso, composto predominantemente por quartzitos, filitos e mica-xistos, além dos derrames e depósitos cretáceos (e pós cretáceos) da Bacia do Paraná (Cortes *et al.*, 2022).

Independentemente da litologia, essas áreas apresentam coberturas detrítico-lateríticas, frequentemente associadas a depósitos ferruginosos além de solos ferralíticos com horizontes cimentados, desenvolvidos *in situ*, ocupando as cotas mais elevadas da paisagem. A presença desses materiais indica a ocorrência de condições paleoambientais favoráveis à ferruginização e à formação de couraças, sugerindo ciclos pedogenéticos sucessivos e distintos regimes de mobilização e acúmulo de ferro.

Ao longo das últimas décadas, pesquisadores têm contribuído para aprimorar o entendimento sobre os materiais de alteração na Serra da Canastra. Vasconcelos (2013) dedicou-se à compreensão dos processos de evolução lateral dos solos na superfície cimeira do chapadão do Zagaia. Cortes *et al.* (2022) e Nazar e Rodrigues (2019) identificaram correlações entre a ocorrência de diferentes tipos de coberturas superficiais e variações nos rádio-elementos eTh , eU e K na superfície cimeira da Serra da Canastra. Ainda assim, persistem lacunas relacionadas à gênese e distribuição dos solos ferralíticos e dos processos de transformação ao longo do tempo.

Em ambientes tropicais altamente intemperizados, como aqueles ocupados por Latossolos e Plintossolos, a transformação do material parental é controlada por uma complexa interação entre intemperismo químico, dinâmica hidrológica e bioturbação.



Esses processos atuam de modo concomitante na reorganização da matriz edáfica, promovendo a formação de estruturas tanto macro quanto micromorfológicas (Milagres *et al.*, 2021; Campos *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2023).

Alguns autores sugerem que a estrutura microagregada de solos oxidicos com *ferralic horizons* (WRB) ou horizontes B latossólicos (SiBCS) são essencialmente originadas por processos físicos (Muller, 1977; Bitom; Volkoff, 1991). Outros sugerem que a estrutura migrogranular estaria em grande parte relacionada a atividade biológica (Benayas; Pinto Ricardo, 1973). Há ainda aqueles que destacam a formação como associados a ambos os processos de modo concomitante (Cooper *et al.*, 2005).

A bioturbação, em particular, destaca-se como um dos principais agentes de retrabalhamento do solo, responsável pela mistura e reorganização dos materiais (Eschenbrenner, 1986; Miklós, 1992; Cooper *et al.*, 2005). Agentes biológicos, como raízes e organismos da pedofauna, desempenham papel fundamental nesse processo, atuando na mobilização de partículas, na fragmentação de couraças ferruginosas e na formação de estruturas pedológicas, o que pode resultar em profundas alterações na dinâmica edáfica, inclusive na redistribuição de água e nutrientes.

Diversos estudos contribuíram ao longo do tempo para avanços no entendimento sobre os processos que levam ao desenvolvimento de estruturas microgranulares em solos intensamente intemperizados (Muggler 1998; Schaefer, 2001; Chiapini *et al.*, 2025). Apesar do reconhecimento do papel da bioturbação no processo de latossolização, estudos que investigam a ação da atividade de organismos no solo, em geral, não ultrapassam a seção controle (2 m de profundidade) (Chiapini *et al.*, 2025). Nesse sentido, investigações micromorfológicas tornam-se ferramentas cruciais para identificar elucidar os mecanismos envolvidos na transformação do arranjo e organização das frações sólidas do solo em agregados ao longo do tempo.

Diante disso, este estudo tem como objetivo investigar as microfeições associadas aos processos de bioturbação e mecanismos de formação de microagregados em Latossolos e Plintossolos desenvolvidos nas superfícies cimeiras da Serra da Canastra. Busca-se, assim, aprofundar a compreensão sobre a organização estrutural e microestrutural desses solos, com ênfase no papel da atividade biológica na gênese de microagregados e na transformação de materiais ferruginosos ao longo do perfil.

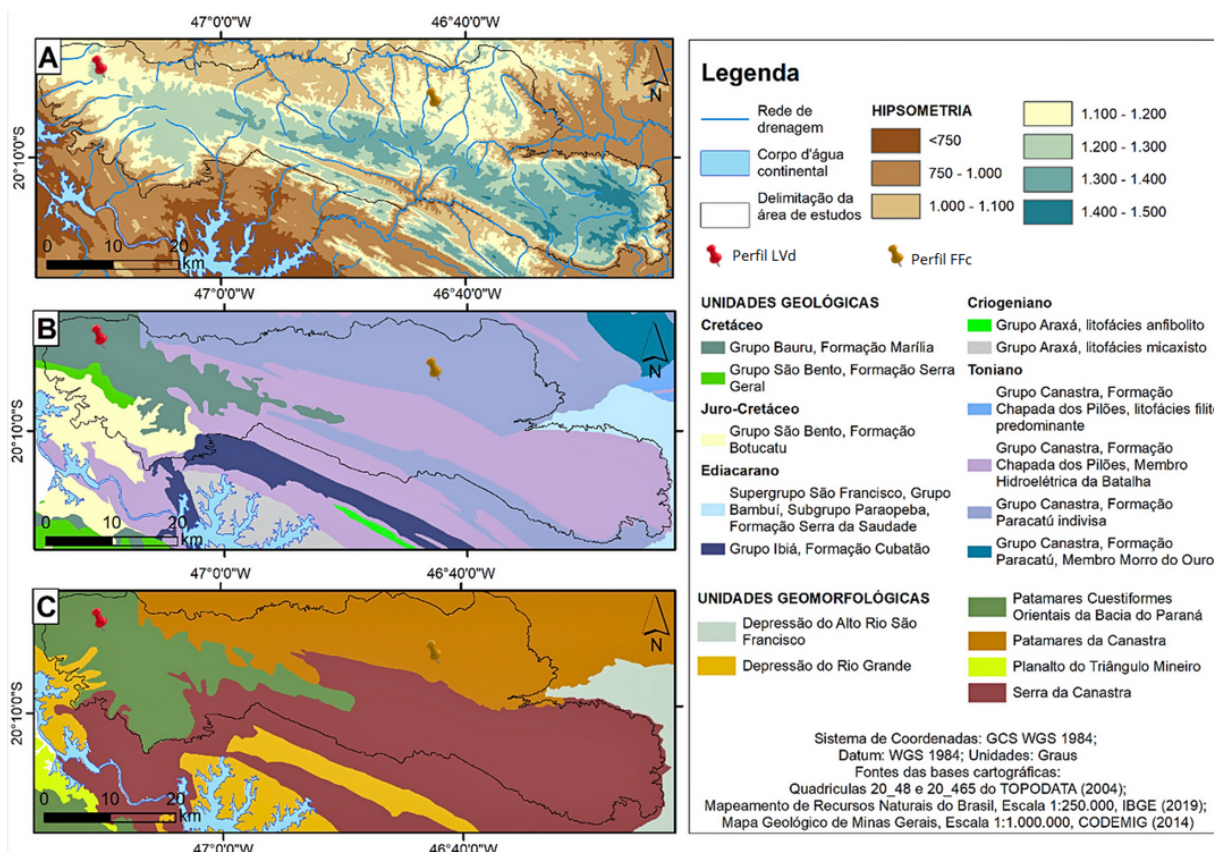


MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudos

A área de estudos está localizada na região da Serra da Canastra (MG). Dois perfis foram selecionados em função de sua posição topográfica e características morfológicas. Na figura 1 estão apresentados aspectos gerais do meio físico além da localização dos perfis.

FIGURA 1: Localização da área de estudos. Mapa Hipsométrico (A); de Unidades Geológicas (B); e de Unidades Geomorfológicas (C). Adaptado de IBGE (2019) e CODEMIG (2014).



O primeiro perfil (**LVd**) encontra-se nas coordenadas $20^{\circ}03'25.0''S$ e $47^{\circ}09'28.5''O$, próximo ao município de Sacramento (MG), em uma área de topo de chapada, a aproximadamente 1203 metros de altitude. Esse perfil foi descrito a partir de uma trincheira com 555 cm de profundidade, escavada ao longo da rodovia BR 464. A topografia da área caracteriza-se por regiões elevadas (acima de 1.000 m), com colinas amplas e pouco dissecadas, interrompidas por escarpamentos íngremes. Nos topos da chapada, encontram-se solos argilosos vermelhos, profundos. Essas áreas de relevo aplainado são interpretadas como remanescentes de antigas superfícies aplainadas.

O segundo perfil (**FFc**) está situado próximo ao município de São Roque de Minas (MG), nas coordenadas: $20^{\circ}06'08.0''S$, $46^{\circ}42'03.53''O$. Foi descrito em um barranco, em um corte de estrada, próximo ao topo de um morrote, a 1232 metros de altitude. A região,



conhecida como “Patamares da Canastra” (IBGE, 2019), apresenta uma topografia mais baixa do que a da Serra da Canastra. O relevo predominante é ondulado a fortemente ondulado, e nessa região há vários morrotes com topos aplainados, onde ocorrem Plintossolos (pétricos/concrecionários).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1936), é do tipo Cwa, caracterizado por um regime de precipitação com duas estações bem definidas, com inverno seco e verão chuvoso. A pluviosidade anual da área varia entre 1.000 mm e 1.600 mm. A vegetação natural é de espécies típicas do Cerrado e do Campo sub-montano, embora grande parte tenha sido convertida para atividades agrícolas, principalmente o cultivo de soja e a silvicultura. Mais informações sobre as características da região podem ser encontradas em Machado e Ladeira (2021).

Descrição do perfil e amostragem do solo

Inicialmente as descrições se deram a nível macroscópico nas faces expostas dos perfis, e em seguida amostras foram coletadas para descrições microscópicas em laboratório. As descrições morfológicas e amostragem dos materiais foram realizadas de acordo com Santos *et al.* (2015) e Castro e Cooper (2019). O solo foi classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos *et al.*, 2018).

Micromorfologia

Para as análises micromorfológicas, amostras orientadas e indeformadas foram coletadas, em caixas de papel cartão com 9x12 cm, que posteriormente foram impregnadas com resina de poliéster, seguidas de corte, desbaste e montagem (Castro; Cooper, 2019). A coleta privilegiou as áreas mais características de cada horizonte. As lâminas utilizadas neste trabalho foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências (USP). As observações foram feitas com auxílio de lupa estereoscópica trinocular OPTON TIM-10T e de microscópio ótico polarizante binocular (tipo petrográfico) Leica DM EP. Os procedimentos de descrição das lâminas seguiram Castro e Cooper (2019) e foram realizadas sistematicamente sobre as amostras da base para o topo das seções. A terminologia empregada nas descrições foram aquelas presentes em Stoops *et al.* (2018); Stoops *et al.* (2021) e Castro e Cooper (2019).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

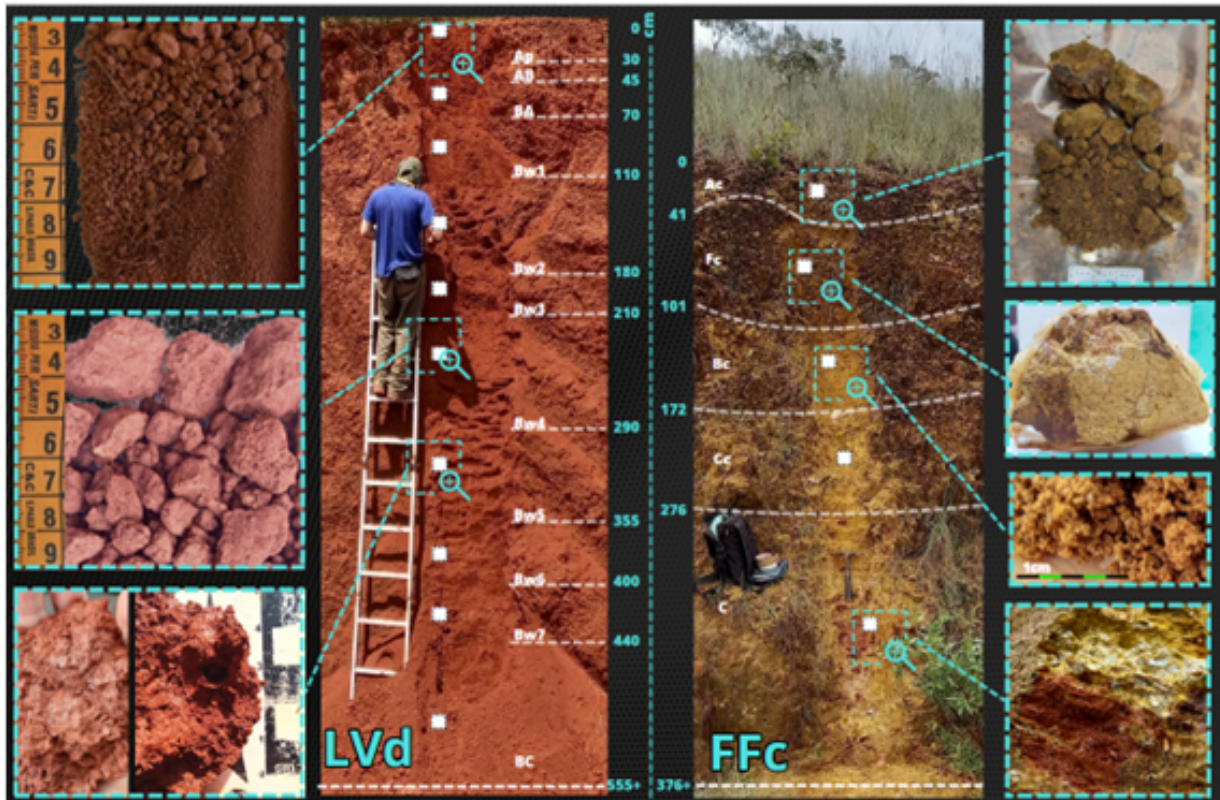
Observações em campo – caracterização morfológica

A cerca de 1200 m de altitude, na região conhecida como Chapadão do Bugre (Sacramento – MG) o perfil descrito corresponde à um Latossolo Vermelho Distrófico típico (**LVd**) com sequência de horizontes A-AB-BA-Bw, derivados de depósitos argilosos, correlatos à elaboração da Superfície Sul-Americana (Figura 2). O solo apresenta textura argilosa (entre 53 e 70% de argila) com transição difusa e plana entre os horizontes. Sua coloração é vermelha (2,5YR a 10R). De modo geral, o solo é friável, ligeiramente duro, ligeiramente plástico e pegajoso. Predominam estruturas do tipo granular nos horizontes A e AB e, nos demais, blocos subangulares de tamanho médio a grande com grau de desenvolvimento ao menos moderado, os quais se desfazem em agregados com estrutura microgranular pequena/muito pequena, com forte grau de desenvolvimento. Há uma tendência de aumento do tamanho dos agregados e diminuição do grau de desenvolvimento da estrutura, do topo para a base e presença de superfícies lustrosas.

Em cota semelhante, à 1232 m de altitude, na região conhecida como Patamares da Canastra (São Roque de Minas – MG) o segundo perfil descrito corresponde à um Plitossolo Pétrico Concrecionário típico (**FFc**), com sequência de horizontes Ac-Fc-Bc-Cc-C (Figura 2). O horizonte superficial (Ac) é constituído por Nódulos alteromórficos com \emptyset 1 a 7 cm entremeados à matriz terrosa bruno-amarelada composta por microagregados pequenos. Abaixo deste, um *duricrust* ferruginoso fragmentado (Fc) cujas estruturas são inferiores à 20 cm e se rompem em blocos com \emptyset 15 - 5 cm além de material terroso microagregado de coloração 10YR 5/8. Abaixo do horizonte cimentando, há formação de um horizonte com material terroso, amarelo (7,5YR 7/8), microagregado, argiloso-cascalhento com abundantes nódulos de ferro \emptyset 1-5 cm (Bc). Próximo à base do perfil, os horizontes Cc e C são apédicos, com consistência variada entre extremamente dura a ligeiramente dura onde há presença de nódulos de ferro e macia e muito friável na transição para o material de origem (Granada—mica xistos, Grupo Araxá) com coloração variegada (vermelhas, amarelas e branco).



FIGURA 2: Perfis descritos. Os quadros brancos indicam a posição aproximada onde foram realizadas as coletas de amostras indeformadas para análise micromorfológica.



Observações em laboratório: análise micromorfológica

No **LVd** a micromassa é em grande parte, isotrópica, todavia observam-se cores de interferência fraca, estriada, visíveis a partir de 10x de aumento associada a poros e ao redor de minerais da fração grossa. (b-fábrica poro e grano estriada). Além disso, nos domínios porfíricos dos horizontes mais profundos ocorrem b-fábricas estriadas reticuladas e b-fábrica circular. A distribuição relativa é enáulica no horizonte A, predominando estrutura granular muito pequena (microagregada), moderada a fortemente desenvolvida, com elevado grau de individualização (Figura 3a). O diâmetro médio dos microagregados varia de 50 a 500 μm . O horizonte BA (45-70 cm) marca uma transição do predomínio de distribuição enáulica para porfírica (distribuição porfírica-enáulica). Essas zonas porfíricas densas, são por vezes fissuradas e comumente interrompidas por canais com preenchimentos soltos contínuos, compostos por microagregados sub-angulares e grãos da fração grossa com dimensões mais frequentes no intervalo entre 100-500 μm .

A partir do horizonte Bw1 (70 cm) há predomínio de microestrutura do tipo blocos subangulares e distribuição relativa porfírica, cujos domínios são comumente interrompidos por poros fissurais. Além disso, há também zonas enáulicas associadas



a porosidade construída pela ação biótica, composta por microagregados na forma de preenchimentos, cujas características serão melhor detalhadas adiante (Figura 3b).

Poros de empacotamento dominam o horizonte A e as zonas enáulicas dos demais horizontes. Canais e câmaras constituem parcela significativa da porosidade no perfil, com diâmetro variando entre 750 e 5000 μm . Cavidades e fissuras são mais frequentes nos domínios porfíricos.

No solo descrito no perfil **LVd**, apesar de predominarem feições morfológicas típicas de Latossolos, as observações em escala macro e micromorfológicas indicam que a estrutura e densidade dos horizontes Bw são variáveis no perfil, por vezes, apresentando características transicionais (Moniz; Buol, 1982). Assim como nos Latossolos descritos por Chiapini *et al.*, (2023), conforme aumento da profundidade há incremento no tamanho dos blocos além de agregados com superfícies menos rugosas e brilhantes de aspecto lustroso com grau de desenvolvimento moderado.

No **FFc**, o horizonte Ac apresenta estrutura microgranular fortemente desenvolvida, cujos *peds* apresentam tamanho entre 150-200 μm . Além do horizonte A (Figura 3c), apenas em Bc observa-se maior desenvolvimento da microestrutura e conseqüentemente a proeminência de zonas enáulicas (Figura 3d). No horizonte Fc, a distribuição relativa é porfírica, com o fundo matricial apresentando aspecto mosqueado, onde as porções mais escuras e vermelhas correspondem a áreas mais fortemente cimentadas enquanto aquelas com cores amarelas porções onde há maior degradação dos nódulos de ferro.

Nos horizontes Cc e C também prevalecem o desenvolvimento de zonas porfíricas, com cores distintas, amareladas e avermelhadas, todavia somam-se a estas domínios mais esbranquiçados no fundo matricial, possivelmente associados a presença de material fino com pouca impregnação por ferro (possivelmente caulínico), correspondente as zonas mosqueadas das descrições macromorfológicas.

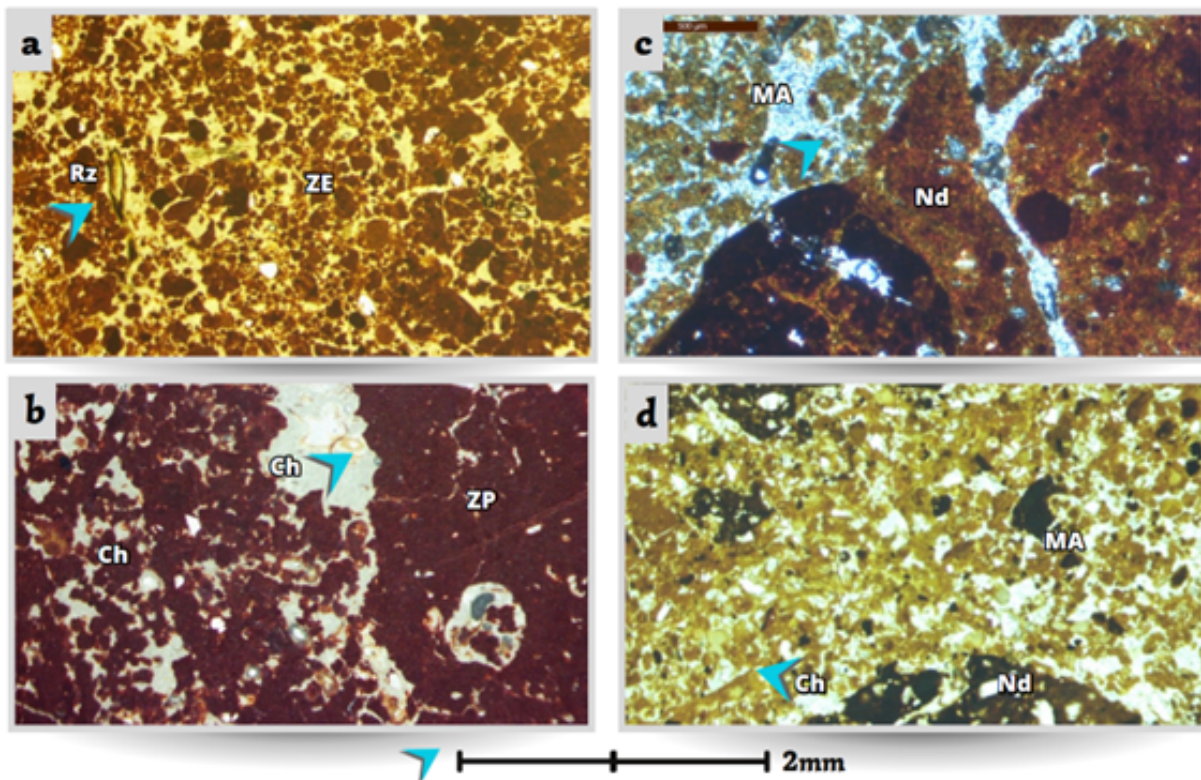
Poros estão presentes em todas as seções, com os principais tipos identificados sendo: nos horizontes Ac e Bc a porosidade é complexa, em ordem de importância é constituída por: poros de intergranulares ou de empilhamento complexos (nódulos, crumbs/microagregados, areia); canais com cerca de 400 μm de diâmetro com paredes alisadas (material fino delimitando). Nos demais, cavidades de dissolução, poros planares e fissurais resultantes de ciclos de umedecimento e secagem variando entre <50 μm e 400 μm de diâmetro e canais gerados pela atividade biológica.

As pedofeições mais comuns são preenchimento denso incompleto do tipo feição de passagem associado à atividade de pedofauna no horizonte Ac, canais com



preenchimento solto contínuo no Horizonte Bc e preenchimento contínuo e denso de argilas, de coloração amarela no horizonte Fc, além dos nódulos típicos ferruginosos, abundantes nos horizontes Ac, Fc, Bc e Cc.

FIGURA 3: Fotomicrografias obtidas em lupa estereoscópica – Perfil LVd, horizonte A – microestrutura granular, com destaque para feições de bioturbação e marcas de raízes (**a**); Horizonte Bw7 – canal com paredes picotadas, possivelmente relacionado a atividade de formigas – note como há mais de uma geração de canais, ambos com preenchimentos soltos contínuos (**b**); No perfil FFc - horizonte A com estrutura microgranular e cascalhos ferruginosos (**c**); microestrutura granular com moderado grau de desenvolvimento associada à nódulos de ferro típico no horizonte Bc (**d**). Rz=raiz; ZE= Distribuição relativa Enáulica; ZP= Distribuição relativa Porfírica; Ch = canal; MA= Microagregados; Nd= Nódulos.



Aspectos físico-químicos na formação dos microagregados

Do ponto de vista físico a intensa fissuração das densas zonas porfíricas (Figura 3a-b) e a ocorrência de b-fábricas reticulada, grano e poro estriada e circular (Figura 3c-d) e são evidências do já mencionado processo de expansão e contração da matriz do solo (Stoops; Buol, 1985) resultado dos sucessivos ciclos de umedecimento e secagem. Conforme intensificação do processo a fissuração da matriz do solo, o estabelecimento de uma rede de poros planares daria origem a agregados poliédricos (Figura 4 a-b) enquanto nas zonas com estágios mais avançados de microestruturação, as fissuras interpedais evoluem para poros de empacotamento (Figura 4f).



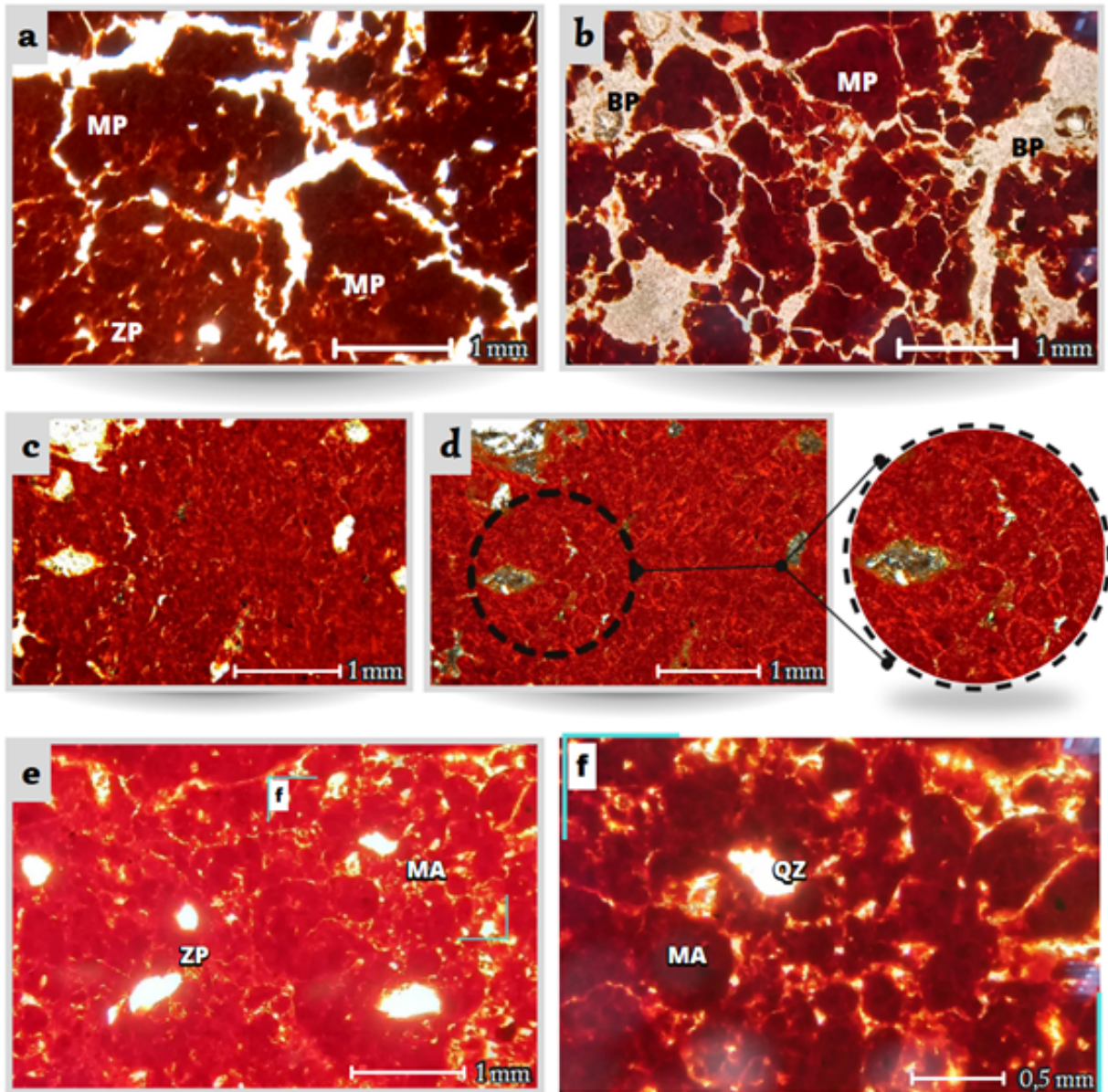
Quando interceptados pela ação de animais escavadores nos horizontes onde predominam zonas porfíricas, parte dessas microestruturas é incorporada como preenchimento em canais e câmaras, evidenciando sua transformação (Figura 4d). Apesar do processo de fissuração ser mais perceptível nos horizontes mais profundos há evidências mesmo nos horizontes mais superficiais, onde zonas porfíricas residuais encontram-se muito fissuradas, dando origem também a agregados angulosos.

Todavia, tais processos físico-químicos não dariam origem a apenas agregados angulosos. Muller (1977) define cinco tipos genéticos de microagregados (*network; zoogenetic; complex; relict; e ferritic*). De especial interesse nesse caso, aqueles formados a partir de redes (*network*) seriam oriundos de uma reorganização da fração fina do fundo matricial do solo. De acordo com o autor (*op.cit*) a sequência de desenvolvimento desse processo, denominado de microestruturação, seria a formação de uma matriz com b-fábrica reticulada (Figura 4c-d), abrangendo áreas entre 50-200 μm , evoluindo a partir de um fundo matricial com b-fábrica salpicada. Em seguida, gradativamente as listras tornariam-se mais e mais descoloridas (em luz plana), ao ponto de desenvolver microfissuras, individualizando os microagregados (Figura 4 e-f).

No caso do **Lvd**, tal processo justificaria a ocorrência de microagregados entre 50-200 μm , em meio a densas zonas porfíricas que predominam nos horizontes mais profundos (+500 cm) em que há pouca evidência de bioturbação. Sua estabilidade estaria associada à forte interação entre caulinita e óxidos de ferro, que atuariam como agentes cimentantes em pequenas escalas ($\sim 2 \mu\text{m}$) num primeiro momento de formação dessas microestruturas (Martinez; Souza, 2020).



FIGURA 4: Principais vias de formação e morfologia de microagregados no PS. **a)** A fissuração da matriz do solo levando a formação de microagregados poliédricos; **b)** interceptação em zonas porfíricas por bioporos levando a intensificação da fissuração e destacamento de partes da matriz porfírica na forma de microagregados poliédricos. **c)** Ocorrência de b-fábrica reticulada e circular no horizonte Bw7, entre 400-440 cm de profundidade (PPL); **d)** o mesmo que c) em em XPL. **e) -f)** avanço do processo de formação de microagregados arredondados em zona porfírica não relacionados a bioturbação. MA = Microagregados Arredondados; MP = Microagregados Poliédricos; MC = Microagregados complexos; ZP = Zona Porfírica; QZ = Quartzo; BP = Bioporo. Fotomicrografias utilizando microscópio petrográfico com Luz Polarizada Plana.



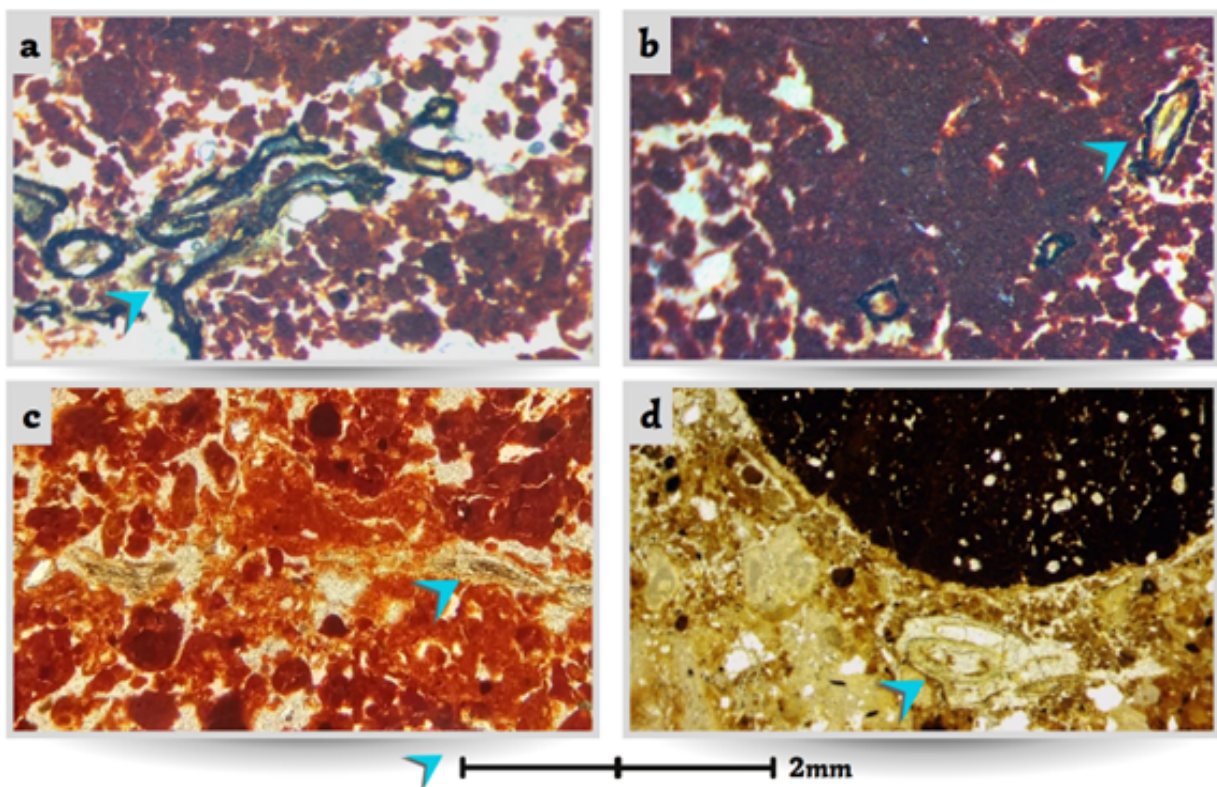


Bioturbação: feições e agentes

A caracterização micromorfológica também evidenciou a intensa bioturbação nas seções verticais. Em todos os horizontes de **LVD** e principalmente nos horizontes **Ac** e **Bc** de **FFc** foram identificadas evidências de atividade biológica atestada pela presença de preenchimentos contínuos, e descontínuos, além de feições de passagem e excrementos (Stoops 2021).

A ação promovida pelas plantas devido ao desenvolvimento do sistema radicular foi identificada até 100 cm de profundidade, sendo mais evidente nas porções mais superficiais. Restos da estrutura vegetal, canais e cavidades entre 250-700 μm de diâmetro, com ocorrência de compactação na periferia dos poros e bordas internas alisadas, foram as principais evidências. Além disso, há notável relação entre o desenvolvimento das raízes associados a canais escavados pela fauna do solo (Figura 5).

FIGURA 5. Fotomicrografias de biofeições produzidas por raízes: Perfil LVd - **a)** horizonte Bw1 90-100 cm; **b)** horizonte A 05-15 cm; **c)** horizonte BA 55-65 cm; Perfil FFc - **d)** horizonte Bc; 101-172 cm; Imagens obtidas com uso de lupa estereoscópica com aumento de 2x.



Ao mesmo tempo em que processos físicos atuam na fissuração da matriz do solo, agentes bioturbadores são responsáveis pela intensificação do dismantelamento das estruturas em blocos, resultando na formação de estruturas menores, arredondadas ou ovaladas. Evidência da origem zoogenética destes tipos de microestruturas foram



reportadas por Miklós 1992, Vidal-Torrado *et al.* (1999), Schaefer 2001 e Cooper *et al.* 2005. O retrabalhamento do solo pela fauna consiste num dos principais responsáveis pela homogeneização do perfil e pela dinâmica de formação das microestruturas típicas que ocorrem nos Latossolos (Miklós, 1992; Nascimento *et al.*, 2024).

No **LVd**, há intensa atividade biológica no solo demonstrado pelos resultados das análises micromorfológicas. Câmaras e cavidades com formatos irregulares ou arredondadas, não concêntricas, são comuns a todos os horizontes, variando entre 250 e 8000 μm de diâmetro (Figura 6 a-c). Feições de preenchimento e excrementos foram identificados desde o topo até a base da seção vertical. Assim como as cavidades, as feições típicas de canais são comuns até 450 cm de profundidade. Os canais apresentam formas e orientações variadas, de modo que os mais evidentes são aqueles com diâmetro entre 1000-2300 μm , com paredes onduladas e/ou picotadas/serrilhadas, derivado das atividades de cupins e formigas (Figura 6 a-b).

De modo geral, tanto canais, quanto cavidades e câmaras encontram-se ocupadas por preenchimentos soltos contínuos ou descontínuos em todos os horizontes de **LVd** (Figura 6 a-c) e são comuns até 300 cm de profundidade em **FFc** (Figura 6f). Os materiais que formam estes preenchimentos são em geral microagregados e excrementos com dimensões e formatos variados. Aqueles com formatos arredondados/sub-angulares entre 100-300 μm e poliédricos e complexos entre 250-600 μm são os mais comuns. Excrementos na forma de microesferas (Figura 6b) ocorrem de modo generalizado, no perfil, chegando a 550 cm em LVd e 300+ cm em **FFc** evidenciando a extensão da atividade biológica em ambientes tropicais.

Os microagregados associados a estas feições de bioturbação se enquadram parcialmente às características descritas por Eschenbrenner (1986) e Miklós (1992) para atribuição zoogenética quanto a origem dos agregados. De acordo com este autor cinco são as características relacionadas, a saber: formato oval, tamanho entre 100 e 1000mm, presença de neostrians nas periferias, coloração diferente do fundo matricial, matéria grossa bem selecionado em seu interior. Destas, apenas a forma e tamanho foram descritas nas seções delgadas, resultado semelhantes aos de Chiapini *et al.* (2023).

Raros foram os microagregados com presença de quartzo associado, justificado pelo fato do solo ser muito argiloso. Mesma situação observada para a frequência da variação de cores, dada a isocromia no perfil. Apenas no horizonte Bw5 de LVd (300 cm de profundidade) foram descritos microagregados, associados a canais, com cores distintas das predominantes no fundo matricial da seção. Quanto a isso, justifica-se, pois, o baixo conteúdo de carbono orgânico no solo e o elevado grau de homogeneidade



dos horizontes. Por sua vez, cores de interferência associadas a ocorrência de neostrians podem ser mascaradas pela abundante concentração de óxidos de ferro (Cooper *et al.*, 2005; Chiapini *et al.*, 2023).

Microagregados complexos podem ter origem pela coalescência de agregados menores ou pela ação direta da fauna do solo. Em experimento conduzido em laboratório Chiapini *et al.*, (2021) observou que formigas produzem agregados complexos, com formatos irregulares e rugosos (com superfície serrilhada ou mamilada).

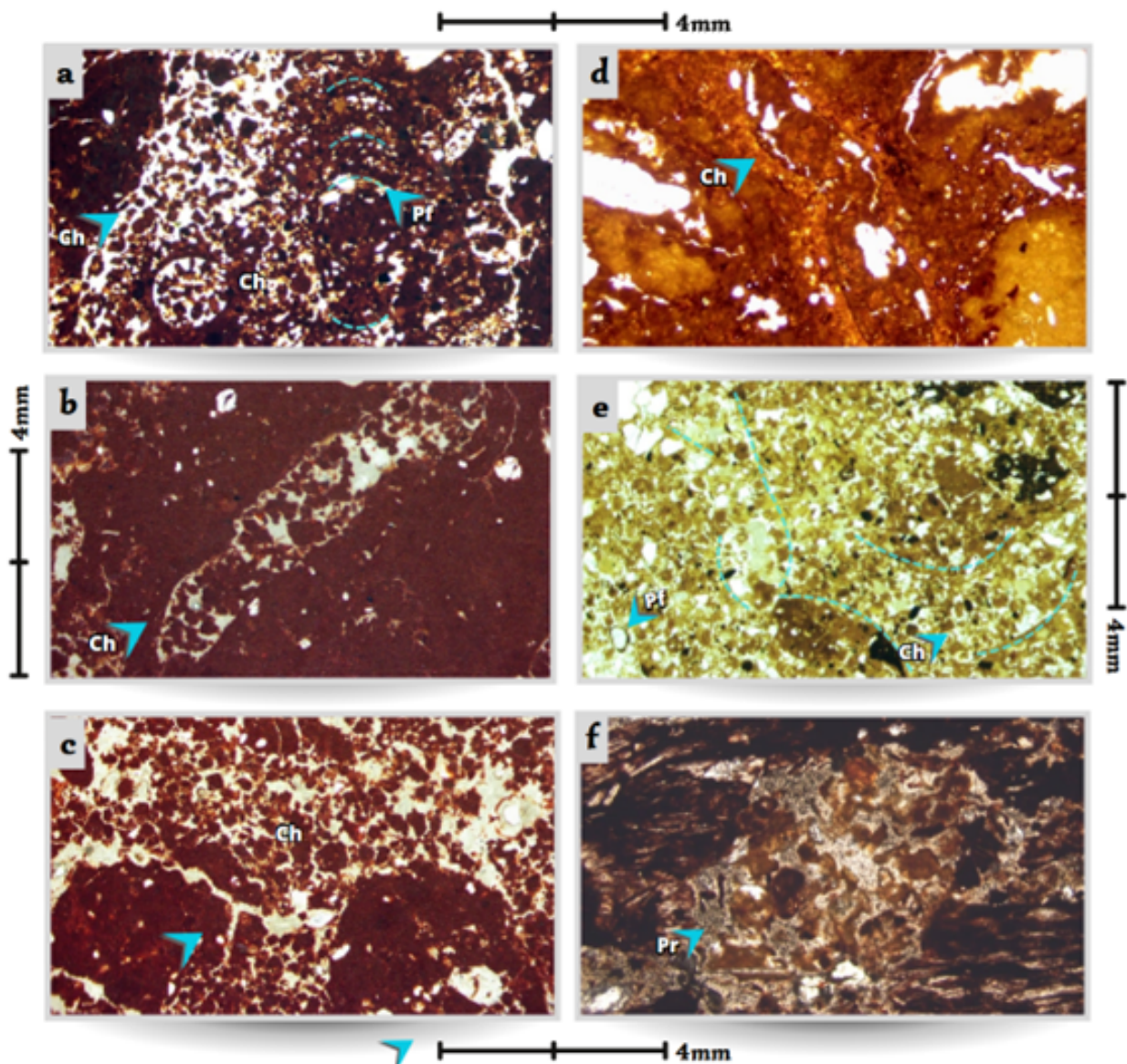
Intensa bioturbação foi observada nos dois primeiros metros dos solos, diminuindo de forma não linear em profundidade, tanto no volume quanto na variedade de morfologias, algo também descrito por Rodrigues (2019) e Santos (2023) em Latossolos na região de Piracicaba/SP. Ambas as autoras (*op.cit.*) atribuem a existência de zonas de bioturbação distribuídas de modo irregular no perfil à possibilidade de variações nas condições ambientais, onde condições de maior ou menor umidade influenciariam o comportamento da fauna do solo.

Não por acaso, grande parte dos registros de atividade biológica se concentram mais próximos a superfície, pois é maior o aporte de material orgânico. De acordo com Pavao-Zuckerman (2008), as áreas de maior influência da atividade biológica nos solos estão relacionadas justamente às zonas há maior atividade de animais escavadores, crescimento radicular e fornecimento de detritos orgânicos. Além de suprimento energético (alimentação), os processos de desenvolvimento e senescência das plantas fazem com que as raízes criem espaços entre as partículas minerais dos solos, criando 'vias de acesso' facilitadas para o deslocamento da fauna do solo.

Baseado nas feições de bioturbação identificadas nos perfis, nota-se certa heterogeneidade, que pode estar relacionada a atuação de diferentes grupos de animais. Feições como preenchimentos arqueados, indicando atividades de anelídeos, foram mais comuns até 55 cm de profundidade (Figura 6a). Canais com borda revestidas por material orgânico ou adensadas (Figura 6a-b; c) característico da atividade de cupins são mais comuns nos horizontes superiores de LVd, e foram identificadas nas sequências de horizontes Ac-Fc-Bc de **FFc**. As feições de canais e cavidades com bordas serrilhadas associados a microagregados sub-angulares e complexos sugerem que as formigas contribuem significativamente com o processo de bioturbação do solo **LVd**.



FIGURA 6: Fotomicrografias obtidas com lupa estereográfica com 2x de aumento. Em **LVD** - Múltiplas gerações de canais com preenchimento solto contínuo composto por microagregados e pelotas fecais e feição de passagem com aspecto arqueado (**a**); canal produzido pela atividade de cupins, com pelotas fecais, no horizonte Bw4 (210-290 cm) (**b**); múltiplos canais com preenchimento solto contínuo, destaque para presença de blocos subangulares - note como parte do bloco se parte e passa a preencher o canal (**c**); Em **FFc** canal preenchido no horizonte Fc (41-101 cm) (**d**); canais preenchidos atravessando antigas seções porfíricas e feição de passagem com bordas revestidas por material fino adensado, no horizonte Bc (101-172 cm) (**e**); cavidade preenchida por microagregados subangulares no horizonte C (~300 cm) (**f**). Ch=Canal; Pr=Preenchimento; Pf=Feição de passagem;



Efeitos sobre solos cimentados

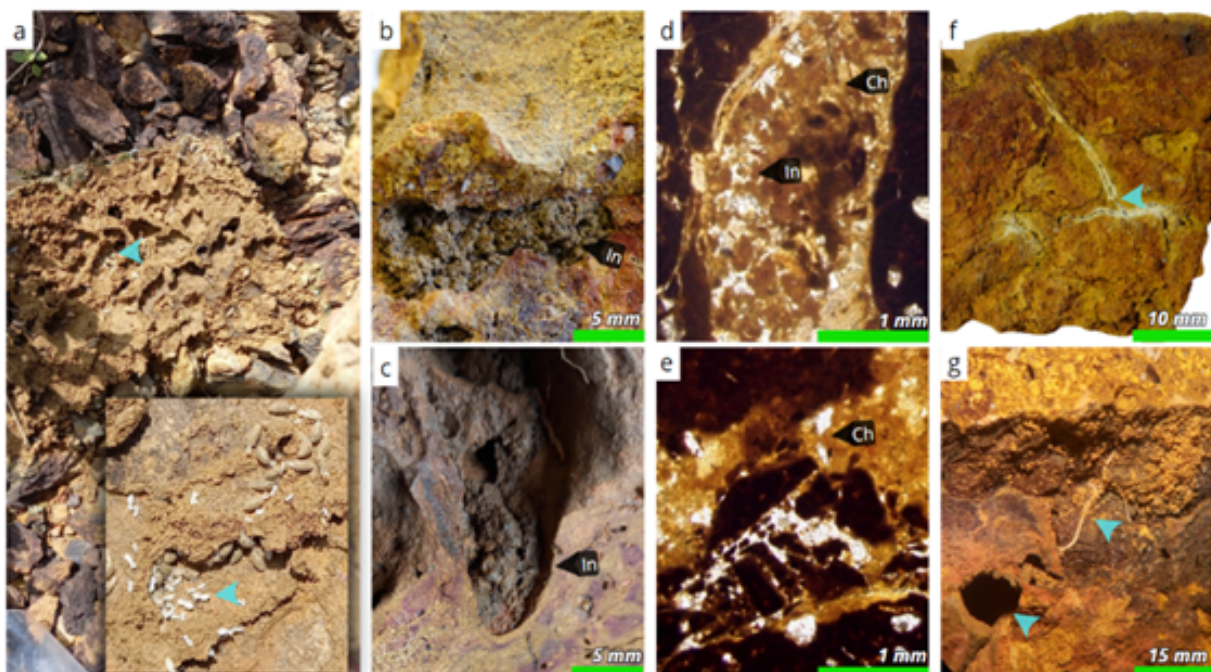
No perfil **FFc**, de particular importância é a degradação ocasionada pelas raízes e pela biota do solo (Figura 7), com especial destaque para a ação dos cupins (Figura 7a). Os horizontes superiores apresentam intensa bioturbação e formação de estrutura



microgranular típica. Feições de passagem são comuns nos horizontes Ac e Bc. Além disso, observou-se canais com preenchimentos soltos contínuos até cerca 300+ cm, nos horizontes Cc e C, normalmente constituídos por microagregados subangulares e fezes.

Os *duricrusts* descritos frequentemente apresentam poros e canais gerados pela atividade de organismos, que desempenham um papel crucial na desagregação desses materiais (Figura 7 b-d). Conforme observado por Campos (2023), a atividade biológica é mais comum nas porções amareladas da matriz, indicando zonas menos endurecidas. Em algumas seções, é possível observar o dismantelamento dos nódulos pela bioturbação (Figura 7e). A abertura desses canais nos horizontes mais cimentados resulta em algo semelhante ao observado no Latossolo (LVd), onde estruturas densas são progressivamente fragmentadas e incorporadas à matriz do solo sob a ação contínua dos organismos, e depois redistribuídas ao longo do perfil.

FIGURA 7: Fotografias e fotomicrografias destacando a atividade de organismos nos *duricrusts* – Horizonte Fc do Perfil FFc. Termitas em galerias esculpidas no interior de um bloco de *duricrust* (a); Canais preenchidos com agregados dos horizontes superiores (b; c); Canal inter-nodular preenchido por material terroso microagregado (d); Canal inter-nodular destacando a capacidade de desagregação mecânica dos nódulos durante o processo de bioturbação/pedoturbação (e); marcas de raízes (f;g) inclusive formando halo de redução (f).





CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preservação prolongada dos solos associados a antigas superfícies permite que processos pedogenéticos, como a latossolização, atuem de forma contínua e intensa, promovendo transformações graduais ao longo do tempo. Nesse contexto, a estabilidade geomorfológica das paleo superfícies não apenas favoreceu o desenvolvimento de solos profundos e bem estruturados, como também evidencia a forte interdependência entre a evolução do relevo e os processos formadores do solo.

As observações micromorfológicas nos perfis **LVd** e **FFc** evidenciam a atuação concomitante de processos físico-químicos e biológicos na gênese de microagregados e no reordenamento da estrutura do solo. Em **LVd**, observa-se um processo ainda ativo de transformação de blocos densos em estruturas microagregadas, mediado por ciclos de umedecimento e secagem, que induzem fissuração da matriz, facilitando a infiltração de água e o trânsito de organismos. Tais condições favorecem a atuação de agentes bioturbadores, que intensificam a formação de feições microgranulares.

No perfil **FFc**, a bioturbação exerce papel na fragmentação dos *duricrusts* ferruginosos. A construção de bioporos facilita a infiltração de água e promove a fragmentação mecânica e química dos nódulos de ferro. Fragmentos desses duricrusts são encontrados como preenchimento em canais e cavidades, sobretudo nos horizontes menos cimentados, evidenciando a redistribuição promovida pela fauna edáfica. A recorrência de microagregados associados a fezes e preenchimentos é semelhante à observada em **LVd**, reforçando a contribuição dos organismos é parte fundamental para as transformações de ordem macro e micromorfológicas nesses tipos de solos.

Por fim, sobre a ocorrência dos microagregados, o que se pode inferir a partir das análises micromorfológicas é que a gênese dessas estruturas se daria a partir de, ao menos, duas vias formativas, aquelas relacionadas à processos físico-químicos e as derivadas dos processos de bioturbação, ambas ocorrendo de modo concomitante.



Agradecimentos:

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. FSBL agradece ao CNPq pela bolsa Produtividade em Pesquisa (Processo 303977/2021-3).

REFERÊNCIAS

- BENAYAS, J.; PINTO RICARDO, R. Aspectos micromorfológicos de solos de uma toposequência ocorrendo em zona tropical húmida (Superfície da Quibala e Angola). **Anais do Instituto Superior de Agronomia** v. 34, p. 181-203. 1973.
- BITOM, D.; VOLKOFF, B. Mise en évidence de deux modes de microstructuration dans une couverture de sols ferrallitiques rouges du Sud-Cameroun. **Science du Sol**, v. 29, p. 289-300. 1991.
- CAMPOS, D.S. de. Duricrusts ferruginosos e aluminosos e relações pedologia-geomorfologia-geologia no Alto Jequitinhonha (MG). 2022. 228 f. Tese (Doutorado). USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2023.
- CASTRO, S. S. de; COOPER, M., **Fundamentos de micromorfologia de Solos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais. 2019.
- CHIAPINI, M. Long and short-term pedogenetic processes in ferralsols from magmatic province of Paraná, Brazil – Piracicaba. 189 p. Tese (Doutorado) – USP/ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2021.
- CHIAPINI M.; NASCIMENTO D.L.; SANTOS T.A.; MARQUES, K.A.; RODRIGUES, B.M.; CAMARGO, P.B.; COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Bioturbation in very deep tropical Ferralsols: A micromorphological study of biomantles. **Catena**, n.256. 109084. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109084>
- CHIAPINI, M.; SCHELLEKENS, J.; OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; CALEGARI, M.R.; VIDAL-TORRADO, P. Pedogenesis in very deep autochthonous Ferralsols of the Paraná Igneous Province (Brazil). **Catena**, v. 224, 2023.
- CODEMIG. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2014. Escala 1:1.000.000.
- COOPER, M. Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio. Tese (Doutorado) – USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 1999.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with ferrallic horizons. **Sci. Agric.**, v. 62, p. 256-263, 2005.
- CORTES, J. P. S.; LUPINACCI, C. M.; MORALES, N. Evolução geomorfológica da borda ocidental da Serra da Canastra: proposição de taxonomia de relevo para estudos de áreas de transição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1858-1875, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2148>
- ESCHENBRENNER, V. Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux. **Cahiers ORSTROM**, Série Pédologie 22, p 397-408, 1986.
- IBGE. Mapeamento de Recursos Naturais – Base Contínua de Geomorfologia do Brasil por Unidades da Federação. 2019. Escala 1:250 000.
- KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro, v. 18, p. 147-265, 1956.
- KÖPPEN, W. Das geographische systemder climate. In: Köppen and Geiger (eds) Handbuch der Klimatologie, Vol I, Part C. Gerbrüder Borntraeger, Berlin, p 44. 1936.



- MACHADO, D.F.T.; LADEIRA, F.S.B. Predição de unidades de mapeamento pedológico usando imagens aerogamaespectrométricas. Anais do XIV ENANPEGE... Campina Grande: Realize Editora, 2021. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/78041>>. Acesso em: 21/07/2025 17:08
- MARTINEZ, P.; SOUZA, I. F. Genesis of pseudo-sand structure in Oxisols from Brazil – A review. **Geoderma Regional**, v.22, 2020, e00292.
- MARQUES, K. P. P. Tropical landscape Evolution and its relationship with paleosurfaces, Ferralsols and ferruginous duricrusts in the Alto Paranaíba region (Central Plateau, Minas Gerais State, Brazil). Piracicaba, 2021. 120 f. Tese (Doutorado) – USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2021.
- MARQUES, K. P. P.; ALLARD, T.; GAUTHERON, C.; BAPTISTE, B.; PINNA-JAMME, R.; MORIN, G.; DELBES, L.; VIDAL-TORRADO, P. Supergene phases from ferruginous duricrusts: non-destructive microsampling and mineralogy prior to (U-Th) / He geochronological analysis. **Eur. J. Mineral.**, v.35, p.383-395, 2023.
- MIKLÓS, A. A. W. Biodynamique d’une couverture pédologique dans la région de Botucatu, Brésil. Tese (Doutorado). Paris: Université de Paris. 1992.
- MILAGRES, A. R.; OLIVEIRA, F. S.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C.; Ferruginous duricrusts associated with Diamond occurrences in the Diamantina Plateau, south Espinhaço Range, Brazil. **J. South Am. Earth Sci.**, v. 111, 2021.
- MONIZ, A.C.; BUOL, S.W. Formation of an Oxisol-Ultisol Transition in São Paulo, Brazil: I. Double-Water Flow Model of Soil Development. **Soil Science Society of America Journal**. v.46, p. 1228-1233, 1982.
- MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesq. Agrop. Brasileira**, v. 37, 869–878, 2002.
- RODRIGUES, B. M. Bioturbação e distribuição de fitólitos em Latossolos da Depressão Periférica Paulista. Dissertação (Mestrado) USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2019
- ROSOLEN, V.; BUENO, G. T.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R.; COELHO, C. V. de S.; ISHIDA, D. A.; GOVONE, J. S. Evolution of iron crust and clayey Ferralsol in deeply weathered sandstones of Marília Formation (Western Minas Gerais State, Brazil). **Journal Of South American Earth Sciences**, v.79, p.421-430, 2017.
- MUGGLER, C.C. Polygenetic oxisols on tertiary surfaces, Minas Gerais, Brazil. 1998. 199 f. Tese (Doutorado). Wageningen, Wageningen Agricultural University. 1998.
- MULLER, J. P. Microstructuration des stutichrons rouges ferralitiques, à l’amont des modelés convexes (Centre-Cameroun). Aspects morphologiques. **Cahiers ORSTOM**, Série Pédologie v. 15, p. 239-258. 1977.
- NASCIMENTO, D. L.; CHIAPINI, M.; VIDAL-TORRADO, P.; PHILLIPS, J. D.; LADEIRA, F. S. B.; MACHADO, D. F. T.; CAMARGO, R. S.; VALEZIO, E. V.; The underestimated role of leaf-cutting ants in soil and geomorphological development in neotropical America. **EARTH-SCIENCE REVIEWS**, v. 248, p. 104650, 2024.
- NAZAR, T. I. S. M.; RODRIGUES, S. C. Mapping and analysis of surface geocover in the Chapadão do Diamante – MG – Brazil. **Mercator**, Fortaleza, v. 18, p. 1-17, 2019.
- PAVAO-ZUCKERMAN, M. A. Soil Ecology. In (Eds.) Jorgensen, S.E.; FATH, B.D. Encyclopedia of Ecology. **Academic Press**, 2008. P. 3277-3283.
- SANTOS, T. A. Bioturbação e feições poligenéticas profundas em Latossolos da Depressão Periférica Paulista Central - Piracicaba/SP. Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2023.
- SANTOS, H. G. do; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C., ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. Ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. 2015.
- SCHAEFER, C.E.R. Brazilian latosols and their B horizon microstructure as long-term biotic constructs. **Australian Journal of Soil Research** v. 39, p. 909-926. 2001.
- STOOPS, G. **Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections**. Second edition. **Soil Sci. Soc. of Am. Inc.** Madson. 2021.



STOOPS, G.; BUOL, S. W. Micromorphology of oxisols. *In*: DOUGLAS, L. A.; THOMPSON, D. M. (ed.). Soil micromorphology and soil classification. v. 15. Madison: Soil Science Society of America, 1985. p. 105–119.

STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Eds) **Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths**. Second Edition. Elsevier, 2018.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JUNIOR, O. AB.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Modelos de evolução pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14., n. 2, p. 197-212, 2013.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S.; COOPER, M. Pedogênese em uma sequência Latossolo-Podzólico na borda de um platô na Depressão Periférica Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 909-921, 1999.



CARACTERIZAÇÃO DA TRANSIÇÃO SOLO-ROCHA EM GRANITO E GÊNESE DE SOLOS SOBRE GRUS NA REGIÃO DE SALTO (SP)

Mayra Mac Alpine **1**

Diego Fernandes Terra Machado **2**

José Antonio Lemos Veronesi **3**

Emily Suelen dos Santos **4**

Ticiano José Saraiva dos Santos **5**

Francisco Sérgio Bernardes Ladeira **6**

PALAVRAS-CHAVE: grusificação, micromorfologia, intemperismo, regolito.

RESUMO

Perfis desenvolvidos por alteração *in situ* de rochas graníticas são registros fundamentais para compreender os processos intempéricos e a evolução da paisagem, especialmente em ambientes subtropicais. Apesar da ampla literatura sobre solos derivados de granito, a zona de transição entre solo e rocha ainda é pouco explorada. A grusificação (desagregação granular da rocha) é favorecida por microfraturas que intensificam a circulação de fluidos meteóricos, acelerando a alteração mineral. Este estudo investiga a transição solo-rocha em um perfil regolítico sobre granitos do Complexo Itu, em Salto (SP), por meio de descrições morfológicas, análises estruturais em campo, petrográficas, micromorfológicas, físicas e químicas (granulometria, rotina pedológica e FRX). O solo foi classificado como Neossolo Regolítico Distrófico típico. A partir do horizonte C, observa-se um saprolito com 4,02 m de espessura, que não atinge a rocha fresca. Essa zona exibe alta proporção de areia e cascalho (63–88%) e preserva feições estruturais da rocha, como planos de falhas normais e transcorrentes, frequentemente caulinizados. As lâminas delgadas revelam a presença de quartzo, ortoclásio, plagioclásio, pertita e biotita — os três últimos frequentemente sericitizados. A microfissuração é marcante, inclusive em minerais mais resistentes como o quartzo, com preenchimentos por materiais finos, sugerindo remobilização local de produtos de alteração, especialmente

1 Mestranda do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - SP, mayralpine@gmail.com

2 Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas - SP, diegoftmachado@gmail.com

3 Graduando do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - SP, joselemosveronesi@gmail.com

4 Graduanda do Curso de Geologia da Universidade Estadual de Campinas - SP, e260186@dac.unicamp.br

5 Prof. Dr. no Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas - SP, ticiano@unicamp.br

6 Prof. Dr. no Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas - SP, ladeira@unicamp.br



da biotita. Expressiva desagregação e reorganização do material, associadas à herança estrutural e mineralógica, apontam para uma memória pedológica e geológica relevante, cuja análise contribui para a compreensão dos estágios de intemperismo e evolução da paisagem granítica na região.

INTRODUÇÃO

A formação dos solos é fortemente influenciada pelo material de origem, pelas condições climáticas, estruturais, além do tempo de exposição às dinâmicas superficiais. Destes fatores, o material de origem desempenha papel central na definição das características texturais e mineralógicas iniciais dos perfis, o que influencia diretamente os caminhos possíveis da pedogênese (Butt *et al.*, 2009). A assinatura geoquímica dos solos tende a refletir a composição elementar das rochas das quais se originam, ainda que fortemente modulada pelos processos de transformação e de translocação, que envolvem a mobilização e o transporte de constituintes ao longo do perfil (Kämpf; Curi, 2008).

Dentre os produtos resultantes da alteração de rochas graníticas, o *grus* é uma feição recorrente em diferentes contextos climáticos e geológicos. O termo designa a desagregação intempérica da rocha em fragmentos angulosos, mal selecionados e com textura grossa (Migon, 1997; Migon; Thomas 2002). A ocorrência de mantos de *grus* foi descrita em quase todas as zonas climáticas, onde perfis com mais de 20 metros de espessura podem ser desenvolvidos (Migon; Thomas, 2002). Sua formação pode representar uma fase inicial da transição entre rocha e solo, que promove transformações físicas, químicas e mineralógicas que desagregam as rochas e iniciam a formação do regolito.

O intemperismo químico de minerais como feldspatos e biotita, presentes nos granitóides, origina fases secundárias como caulinita, vermiculita e óxidos de ferro e alumínio, que passam a compor o arcabouço mineral do solo em formação. Em climas tropicais úmidos, esses processos favorecem a formação de mantos espessos de alteração (Melfi *et al.*, 1983; Kanhaiya *et al.*, 2024). A topografia, a drenagem e o tempo de exposição também influenciam a diferenciação dos horizontes e o padrão de neoformação mineral (Tardy *et al.*, 1973; Perri, 2020). Além disso, processos geológicos como a alteração hidrotermal e o tectonismo podem modificar o arranjo mineralógico dos perfis (Evans; Bothner, 1993; Scarciglia *et al.*, 2016; Popli *et al.*, 2022; Aehnelt; Totsche, 2025).

Diversos autores têm apontado a importância de se considerar a sobreposição de feições geológicas e pedológicas na zona de transição entre a rocha fresca e o solo. Evans e Bothner (1993), ao analisar o *grus* de granitos, demonstraram que alterações minerais como a sericitização em plagioclásios e pertitas, assim como microfraturas preenchidas, podem ser atribuídas à atividade hidrotermal, anterior ao início da pedogênese. Abordagem semelhante foi adotada por Scarciglia *et al.* (2016), ao apontarem que



alterações hidrotermais herdadas (como a sericitização de feldspatos e a cloritização de biotita) podem resultar em uma superestimação do grau de intemperismo. Isso se deve ao fato de que feições aparentes de degradação mineral podem já estar presentes no substrato rochoso.

Feições estruturais associadas a esforços tectônicos, como falhas e microfraturas, são reconhecidas como importantes condicionantes da desagregação de rochas e do avanço da alteração química. Aehnelt e Totsche (2025) demonstraram que a formação de *saprock*s (rochas alteradas com preservação de estruturas primárias) é influenciada pela herança litológica e pelos processos tectônicos anteriores à exposição meteórica. Essa herança influencia a forma como os minerais primários se alteram e, por consequência os produtos da pedogênese em seus estágios iniciais.

Esses achados reforçam a importância de considerar a sobreposição entre processos exógenos e endógenos na gênese de perfis regolíticos graníticos, especialmente no contexto da grusificação (Popli *et al.*, 2022; Perri, 2020). Embora o intemperismo químico atue de forma contínua, modulando a solubilidade e redistribuição dos elementos (Melfi *et al.*, 1983; Tardy *et al.*, 1973), sua ação pode ser intensificada por estruturas herdadas. A concepção de um *continuum* rocha-solo (*bedrock-saprock-subsoil-soil*) tem se mostrado útil nesse sentido, permitindo interpretar essa zona transicional em que feições pré-existentes coexistem com atributos pedogenéticos, como neoformações de argilas, iluviação de finos e incremento da porosidade (Aehnelt; Totsche, 2025).

Tendo isso em vista, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a organização de um perfil regolítico desenvolvidos por alteração *in situ* de rochas graníticas do Complexo Itu (Salto-SP), com foco na transição entre solo e rocha e na identificação de feições diagnósticas que permitam distinguir os processos atuantes na sua gênese. A hipótese que se propõe é a de que há nos perfis sobreposição de processos, cujas evidências podem ser reconhecidas com a integração de dados morfológicos, petrográficos, micromorfológicos, físicos e químicos. Ao abordar a *grusificação* deste perfil como fenômeno multifatorial, espera-se contribuir para uma leitura mais integrada da evolução de superfícies regolíticas graníticas e da pedogênese no contexto regional.

MATERIAIS E MÉTODOS

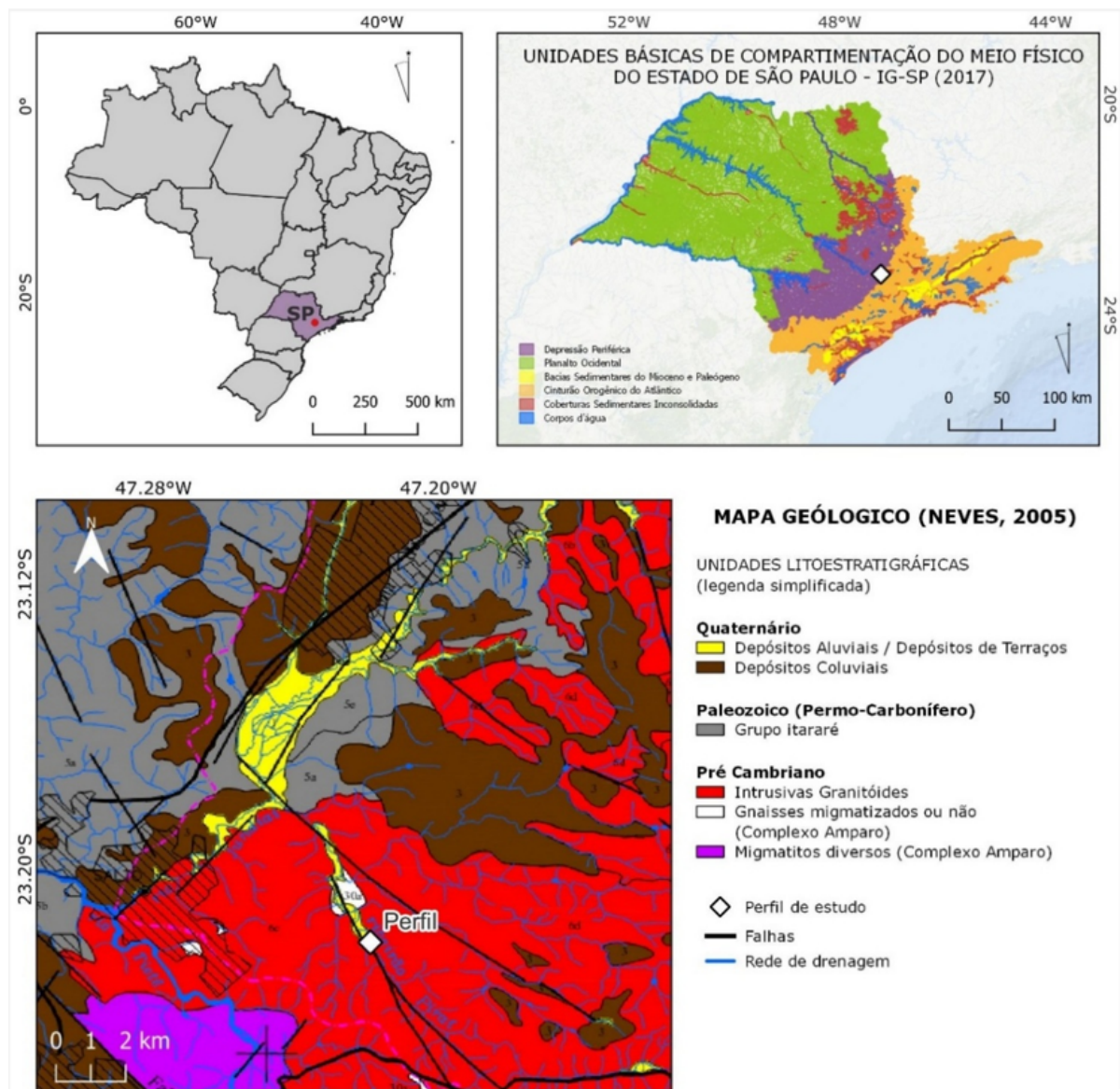
Área de estudo

A área de estudo está localizada entre os municípios de Itu e Salto, no estado de São Paulo. Geologicamente, a região está inserida no contato entre a Bacia do Paraná e o embasamento cristalino Pré Cambriano (Figura 1). Esta região compreende, sobretudo, rochas ígneas do Proterozoico-Eopaleozóico pertencentes ao Domínio



Socorro-Guaxupé. O perfil selecionado está localizado especificamente no Complexo Itu-Cabreúva, composto por sienogranito equigranular cinza, granito porfírico cinza e róseo (Sachs; Morais, 1999).

FIGURA 1: Localização da área de estudo; compartimentação do meio físico e a localização do perfil no contexto geológico no Granito Itu.



A região encontra-se na zona de transição entre as províncias geomorfológicas do Planalto Atlântico e da Depressão Periférica Paulista. De modo geral, a região apresenta relevo com níveis intermediários, caracterizado por colinas de topos aplainados e assoalhos de várzeas predominantemente planos (Carneiro, 2018). A área do perfil é marcada por matações graníticas ao longo das vertentes, por vezes formando *tors*, feições típicas da decomposição de granitos em climas tropicais úmidos (Ab'Saber, 1948; 1954). Essas formas são associadas à antiga superfície do peneplano carbonífero, sobre a qual se depositaram sedimentos glaciais



do Grupo Itararé (Ab'Saber, 1948; Almeida, 1948). A remoção progressiva dessas coberturas, iniciada no final do Cretáceo ou no Eoceno, teria reexposto trechos do embasamento granítico à ação de processos erosivos sob clima tropical (Ab'Saber, 1948).

Trabalho de campo

As descrições morfológicas em campo seguiram a metodologia proposta por Santos *et al.* (2015), conforme o Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo. As coletas foram realizadas nos horizontes identificados durante a caracterização morfológica do perfil. Além disso, fragmentos de rocha foram coletados na base do perfil.

A análise estrutural em campo foi realizada com o auxílio de uma bússola geológica do tipo Brunton. Foram identificadas superfícies de falha e indicadores cinemáticos. Para cada estrutura, foram registrados a orientação estrutural, como intensidade do mergulho e direção dos planos de falha, além da orientação de estrias desenvolvidas no falhamento, permitindo a inferência da orientação do movimento relativo dos blocos.

Análises laboratoriais: determinações físicas, químicas e microscópicas

Para as análises de rotina pedológica, amostras deformadas foram destorroadas e separadas as frações maiores do que 2 mm para quantificação dos cascalhos e obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), submetida à determinação das frações de areia: grossa (1-0,5 mm) e fina (0,25-0,1 mm) e os teores de silte e argila (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm), utilizando método da pipeta conforme Camargo *et al.* (2009).

A partir da TFSA, análises químicas de rotina pedológica seguiram as metodologias propostas por Teixeira *et al.* (2017) e Camargo *et al.* (2009). Foram realizadas análises do pH em água e KCl; determinados os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} e acidez potencial. A partir destas, foram calculadas a soma de base (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), percentual de sódio trocável (PST). O carbono orgânico total (C) foi determinado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico. As determinações foram realizadas no laboratório Unithal (Campinas – SP).

Para caracterização elementar das amostras, empregou-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Os teores dos elementos, expressos em óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5), foram determinados por meio de análise quantitativa em pastilha fundida com tetraborato de lítio na calibração ROC-1, relativa à análise quantitativa por comparação com



materiais de referência certificados, conforme procedimentos internos do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), responsáveis pelo preparo da amostra e a determinação dos elementos

Para o cálculo dos índices de alteração química os teores dos óxidos maiores foram convertidos em proporções molares (cmol_c), conforme descrito por Nesbitt e Young (1982) e adaptado por autores posteriores, permitindo a avaliação da mobilidade diferencial dos cátions alcalinos e alcalino-terrosos. Os índices calculados foram: CIA (Chemical Index of Alteration) = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$, CIA-K = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$, PIA (Plagioclase Index of Alteration) = $[(\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})] \times 100$ (Nesbitt; Young, 1982; Harnois, 1988; Fedo et al., 1995; Price; Velbel, 2003; Sheldon; Tabor, 2009)

Análises e descrições microscópicas foram realizadas com base em lâminas petrográficas produzidas a partir de amostras indeformadas, previamente impregnadas com resina de poliéster, seguidas pelas etapas de corte, desbaste e montagem, conforme descrito por Castro e Cooper (2019). As observações foram feitas com microscópio ótico polarizante binocular (tipo petrográfico) Leica DM EP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização morfológica

O solo apresenta sequência de horizontes A-C-Cr e foi classificado como Neossolo Regolítico Distrófico típico (Figura 2a). Descrito em um barranco com exposição vertical de 4,30 m (Figura 2b), apesar da grande espessura, não se observa formação de estruturas típicas de horizontes B assim como não há contato com a rocha fresca em sua porção basal. Localmente os solos são rasos e comumente associados a afloramentos de matações graníticos, por vezes formando *tors* (Figura 2c).

As cores dos horizontes mais superficiais são brunadas, como 7,5YR 3/3 (bruno-escuro) em razão da maior presença de material orgânico. O horizonte A apresenta baixo grau desenvolvimento da estrutura, que assume a forma de blocos subangulares, muito friáveis com consistência não plástica e ligeiramente pegajosa. Já o horizonte C, imediatamente subjacente, é apédico, cuja consistência molhada é não plástica e não pegajosa, em decorrência da textura mais grossa.

À medida que se avança para os horizontes inferiores (Cr1 a Cr4), em grande medida, é possível observar traços da estrutura do material de origem, embora já bastante alteradas. Nesse, predominam cores vermelho-amarelas, como o 5YR 4/6.

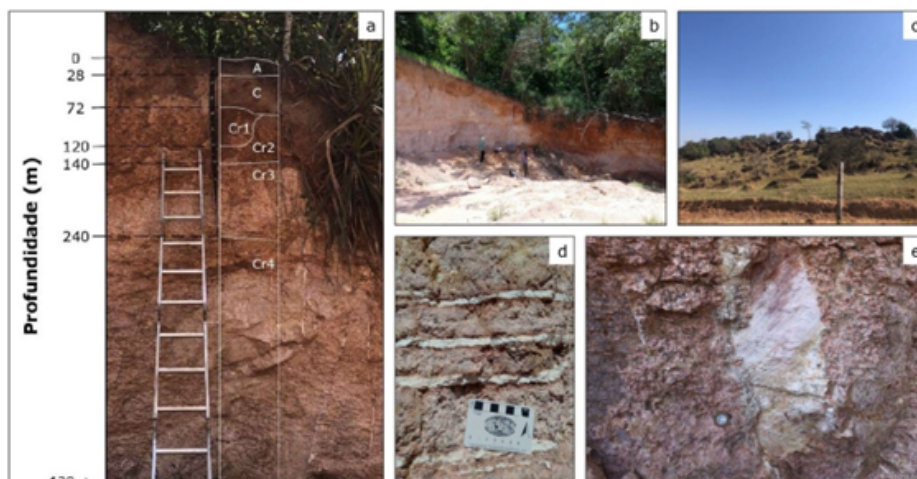


Nos horizontes basais, por sua vez, cores mais rosadas (5YR 8/4) e variegadas estão associadas à alteração da rocha, variando entre vermelho-arroxeadado-acinzentado (5RP 4/2) e amarelo-escuro-acinzentado (5Y 6/4).

Em toda a porção de saprolito grosso, é possível extrair fragmentos médios em forma de blocos angulares, com consistência ligeiramente dura quando secos, mas muito friáveis quando umedecidos. Esses blocos, entretanto, estão associados à alteração da rocha-matriz, e não à formação de agregados pedogenéticos. Ademais, todos os horizontes são cascalhentos, com fragmentos variando entre 0,5 e 3,5 cm de diâmetro. Esses fragmentos tornam-se mais abundantes e maiores nas porções inferiores do perfil, apresentando consistência que varia de extremamente dura a muito dura.

Veios caulinizados se distribuem ao longo da face exposta do paredão, acompanhados por diversos planos de falha no regolito, com orientações distintas, indicando a atuação de esforços tectônicos na área (Figura 2c-d). Esses planos apresentam-se frequentemente caulinizados, com preservação de estrias e acompanhados por minerais esverdeados, os quais, com base na morfologia e no contexto, foram interpretados como possíveis epidotos. A presença desse mineral em falhas e fraturas sugere precipitação associada à circulação de fluidos hidrotermais, que induzem reações metassomáticas ao longo de planos de fraqueza na rocha (Bird; Spieler, 2004). Na área do perfil foram individualizados dois padrões de falhas: i) O primeiro com orientação NE30-70W de inclinação elevada e com desenvolvimento de estrias sub-horizontais para NW, que são associadas a uma tectônica transcorrente (Figura 2e); ii) um segundo padrão com falhas com mergulho intermediário (ao redor de 45°) e desenvolvendo estrias de movimento inclinadas a *dow-dip* que são associadas a falhas normais e normais oblíquas. Não foi possível definir a relação cronológica entre esses dois padrões, entretanto, as transcorrentes NW-SE estão paralelas as grandes estruturas regionais que ocorrem no Granito Itu.

FIGURA 2: **a)** Perfil descrito com indicação dos horizontes morfológicos e respectivas profundidades; **b)** vista ampla do perfil no contexto da paisagem local; **c)** afloramentos graníticos formando tors na paisagem do entorno; **d)** veios preenchidos por material caulínítico; **e)** plano de falha identificado no regolito.





Análise granulométrica

Conforme os dados granulométricos apresentados na Tabela 1, o perfil estudado apresenta textura variando de franco-arenosa a franco-argilo-arenosa. Observa-se uma tendência de aumento nos teores de argila na sub-superfície, com valores entre 20% e 26% nos horizontes A e C, e entre 30% e 35% nos horizontes Cr1 e Cr2, respectivamente, sugerindo uma concentração relativa de argila nos níveis intermediários do perfil. Além disso, os valores de silte seguem uma tendência de redução em direção ao topo, todavia, há uma variação abrupta a partir de Cr1 em direção ao topo.

Como mencionado anteriormente, destaca-se o elevado teor de cascalho e areia. De acordo com Migon (1997) e Migon e Thomas (2002), o tamanho e a proporção das frações granulométricas são critérios importantes para a definição do *grus* de granito e granitóides. Segundo os autores, materiais derivados do intemperismo *in situ* da rocha devem apresentar, idealmente, até 100% de frações areia (0,1–2,0 mm) + cascalho (>2,0 mm), sendo que silte + argila não devem ultrapassar 25% do material analisado.

Somados à areia total (grossa + fina) ao longo de todo o perfil, variando entre 63% e 88%. Apenas dois horizontes (Cr1 e Cr2) excedem o limite proposto de 25% para silte + argila, com 32% e 37%, respectivamente. No entanto, ambos mantêm texturas entre franco-argilo-arenosa e argilo-arenosa, além de preservarem características típicas da grusificação por alteração *in situ*.

TABELA 1: Atributos físicos do solo estudado

Hor.	Prof.	Casc.	Granulometria da TFSA					Silte/ Argila
			A.G	A.F	A.T	Silte	Argila	
	cm		%					
A	0-28	26,0	56,70	13,50	70,20	3,80	26,00	0,15
C	28-72/82	40,0	65,30	12,00	77,30	2,70	20,00	0,14
Cr1	72/82-120	31,0	44,30	10,00	54,30	15,70	30,00	0,52
Cr2	120 - 140	30,0	33,90	13,40	47,30	17,70	35,00	0,51
Cr3	140 - 240	43,0	49,00	11,50	60,50	29,50	10,00	2,95
Cr4	240 - 430+	61,0	61,30	8,80	70,10	21,90	8,00	2,74

TFSA = Terra Fina Seca ao Ar; Casc = cascalho; A.G. = areia grossa (2-1mm); A.F. = areia fina (1-0,05 mm); A.T. = areia total (2-0,05 mm); Silte (0,05-0,002 mm); Argila (<0,002 mm).



Análises químicas de rotina pedológica

As interpretações a seguir baseiam-se nos resultados das análises químicas de rotina (Tabela 2). De modo geral, as características do complexo sortivo indicam um solo intensamente lixiviado, com baixa disponibilidade de bases e alta acidez. Os valores de pH em H₂O variam entre 4,4 e 5,5, e a saturação por alumínio supera 20%. Praticamente todos os horizontes exibem caráter distrófico (V% < 50%) e baixa CTC (< 5 cmolc/kg), com exceção do horizonte A, que apresenta maior capacidade de troca de cátions (11,47 cmol_c/kg) e saturação por bases (52%), provavelmente em função do maior teor de carbono orgânico na superfície (2,4%) (Raij, 2011).

O sódio trocável, por sua vez, apresenta valores entre 0,37 e 0,70 cmol_c.kg⁻¹, com certa variabilidade ao longo dos horizontes. Com base nesses dados, destaca-se a relação de porcentagem de sódio trocável (PST), cujos valores variam de 4,62% a 22,47%, o que é incomum para solos bem drenados em regiões subtropicais úmidas. Esses valores podem ser indicativos de caráter solódico (PST >6%), embora necessitem de outras avaliações como condutividade elétrica, conforme os critérios do SiBCS (Santos *et al.*, 2018), valores de PST elevados sugerem potencial risco à estrutura do solo, por influenciar na dispersão das argilas (Prezotti, 2013).

TABELA 2: Atributos químicos do solo estudado

Hor.	Prof.	pH		Complexo Sortivo								P (Res)	V	m	C	PST
		KCl	H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺	CTC					
	cm			(cmolc/kg)								ppm	%			
A	0-28	4,50	5,20	3,60	1,30	0,54	0,53	5,97	5,50	0,00	11,5	6,00	52,05	0,00	2,40	4,62
C	28-72/82	3,90	4,40	0,60	0,10	0,23	0,38	1,31	2,80	0,60	4,11	1,00	31,87	31,41	0,50	9,25
Cr1	72/82-120	3,80	4,40	0,50	0,10	0,14	0,37	1,11	3,80	1,10	4,91	1,00	22,61	49,77	0,30	7,54
Cr2	120 - 140	4,00	4,60	0,80	0,10	0,18	0,70	1,78	2,80	0,60	4,58	2,00	38,86	25,21	0,30	15,28
Cr3	140 - 240	4,20	4,70	0,20	0,10	0,23	0,40	0,93	1,70	0,60	2,63	1,00	35,36	39,22	0,20	15,21
Cr4	240 - 430+	4,50	5,00	0,20	0,10	0,27	0,60	1,1	1,50	0,60	2,67	1,00	43,82	33,90	0,20	22,47

Hor. = Horizonte; Prof. = Profundidade; S.B. = Soma de Bases; C.T.C. = Capacidade de Troca Catiônica; P (Res) = Fósforo em resina; V% = Saturação por Bases; m% = Saturação por Alumínio; C = Carbono Orgânico; PST = Porcentagem de Sódio Trocável.

Análise química elementar – FRX

De acordo com a Tabela 3, os teores de SiO₂ e Al₂O₃ ao longo do perfil apresentaram tendências opostas: SiO₂ manteve-se elevado nos horizontes A e C, enquanto Al₂O₃ concentrou-se nos horizontes intermediários (Cr1 e Cr4), contrastando parcialmente



com o modelo clássico de intemperismo. O Fe_2O_3 variou pouco, mas mostrou leve enriquecimento em Cr1 (1,73%), coincidindo com os maiores teores de Al_2O_3 (13,2%) e os menores de SiO_2 (76,8%), sugerindo acúmulo de minerais secundários.

Os elementos móveis (MgO , CaO e Na_2O) teores muito baixos ao longo do perfil, exceto o Na_2O na rocha matriz, evidenciando intensa lixiviação. O K_2O , por sua vez, mostrou distribuição não linear, com flutuações entre os horizontes e valores sempre superiores aos da rocha, o que indica possível redistribuição ou retenção em fases secundárias.

TABELA 3: Valores médios das concentrações dos principais elementos (expressos em porcentagem em peso de óxidos)

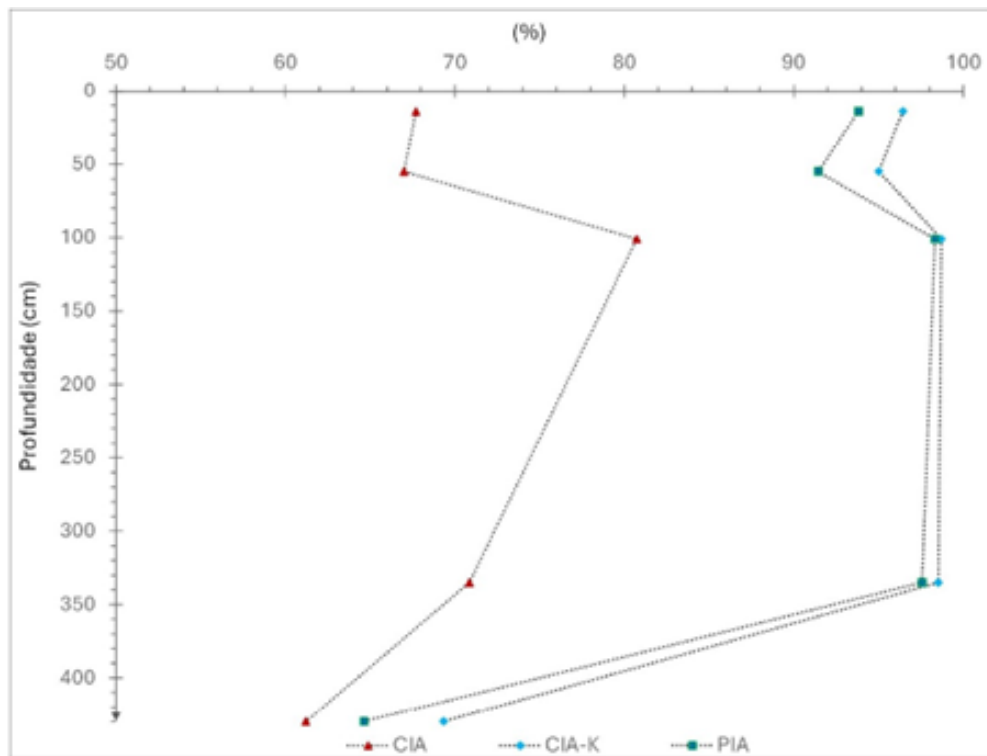
Hor.	Prof.	Na2O	K2O	CaO	MgO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	TiO2	P2O5	PF
	Cm	%										
A	0-28	0,05	2,91	0,1	0,05	81,5	7,16	1,67	0,1	00,12	0,05	5,58
C	28-72/82	0,18	3	0,05	0,05	84,9	7,38	1,67	0,05	0,12	0,05	1,99
Cr1	72/82-120	0,05	2,75	0,05	0,05	76,8	13,2	1,87	0,05	0,11	0,05	4,45
Cr4	240 - 430+	0,05	4,21	0,05	0,05	79,1	11,5	1,26	0,05	0,05	0,05	2,86
R	-	2,59	1,74	0,05	0,05	81,9	9,84	1,36	0,05	0,5	0,05	1,61

Os índices geoquímicos utilizados para avaliar o grau de intemperismo ao longo do perfil estão apresentados na Figura 3. As variações no índice de CIA indicam uma tendência geral de aumento do grau de intemperismo ao longo do perfil, com destaque para os horizontes intermediários, que apresentam os valores mais elevados. Nos horizontes superficiais, os valores são mais moderados, refletindo possível influência de processos que atenuam a concentração relativa dos elementos menos móveis.

A comparação entre CIA e CIA-K revela diferenças significativas, especialmente nos horizontes A e C: onde o CIA-K atinge valores muito superiores (ultrapassando 95%). O uso do índice CIA-K ou CIW (*Chemical Index of Weathering*), proposto por Harnois (1988), é especialmente relevante por excluir o K_2O da fórmula, minimizando a influência de elementos móveis como o potássio. Como discutido por Santos *et al.* (2022), o CIA-K tende a ser mais eficiente para avaliar o grau de intemperismo vertical em perfis regolíticos. Essa diferença indica o papel do K_2O na subestimação do grau de alteração quando incluído na fórmula original (Harnois, 1988). Isto é, indica-se que, apesar de morfologicamente pouco desenvolvidos, os horizontes superficiais já passaram por intensa alteração dos feldspatos. Essa interpretação é corroborada pelos valores do índice PIA, que permanecem elevados, evidenciando a degradação avançada desses minerais até aos níveis superiores do perfil.

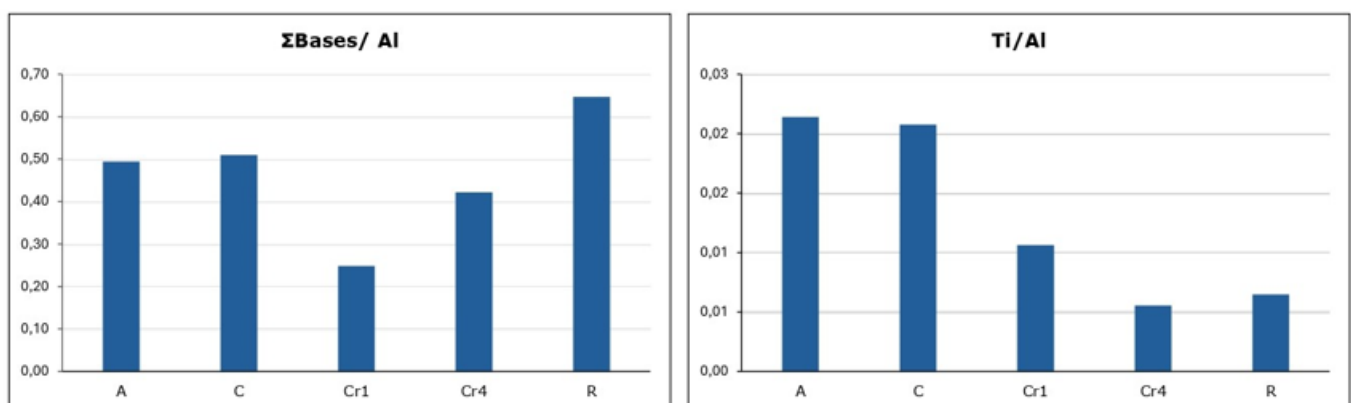


FIGURA 3: Variação dos índices geoquímicos de intemperismo com a profundidade do perfil. Correlação entre CIA (Chemical Index of Alteration), CIA-K e PIA (Plagioclase Index of Alteration).



As razões $\Sigma\text{Bases}/\text{Al}$ e Ti/Al (Figura 4) corroboram essas interpretações, complementando os dados dos índices geoquímicos e da distribuição dos óxidos maiores. A razão $\Sigma\text{Bases}/\text{Al}$ apresenta os menores valores nos horizontes intermediários, sobretudo em Cr1, sinalizando acentuado empobrecimento em bases. Em contrapartida, os maiores valores nos horizontes A e C sugerem menor grau de lixiviação ou possível retenção superficial de bases.

FIGURA 4: Distribuição das razões molares de bases trocáveis por alumínio ($\Sigma\text{Bases}/\text{Al}$) e de titânio por alumínio (Ti/Al) ao longo dos horizontes do perfil.





A razão Ti/Al, por sua vez, é mais elevada nos horizontes superficiais e diminui com a profundidade, indicando um acúmulo relativo de alumínio em Cr1 e Cr4. Esse comportamento acompanha o aumento dos teores de Al_2O_3 nesses horizontes, apontando para a acumulação desse óxido nas porções intermediárias do perfil, seja por alteração *in situ*, seja por processos de translocação. Embora a rocha matriz também apresente baixa razão Ti/Al, esse valor reflete sua composição original: provavelmente rica em minerais aluminosos (como feldspatos e micas) e pobre em fases portadoras de titânio. Vale ressaltar que, como esperado por sua baixa mobilidade, o titânio manteve-se praticamente constante ao longo do perfil, dessa forma servindo como referência para avaliar a redistribuição dos demais óxidos.

Observações petrográficas e micromorfológicas

A partir de observações que partiram do material lítico menos intemperizado até o horizonte superficial, foi possível identificar as transformações graduais dos minerais primários em resposta às alterações, assim como reconhecer feições associadas à mobilização e redistribuição de materiais no perfil.

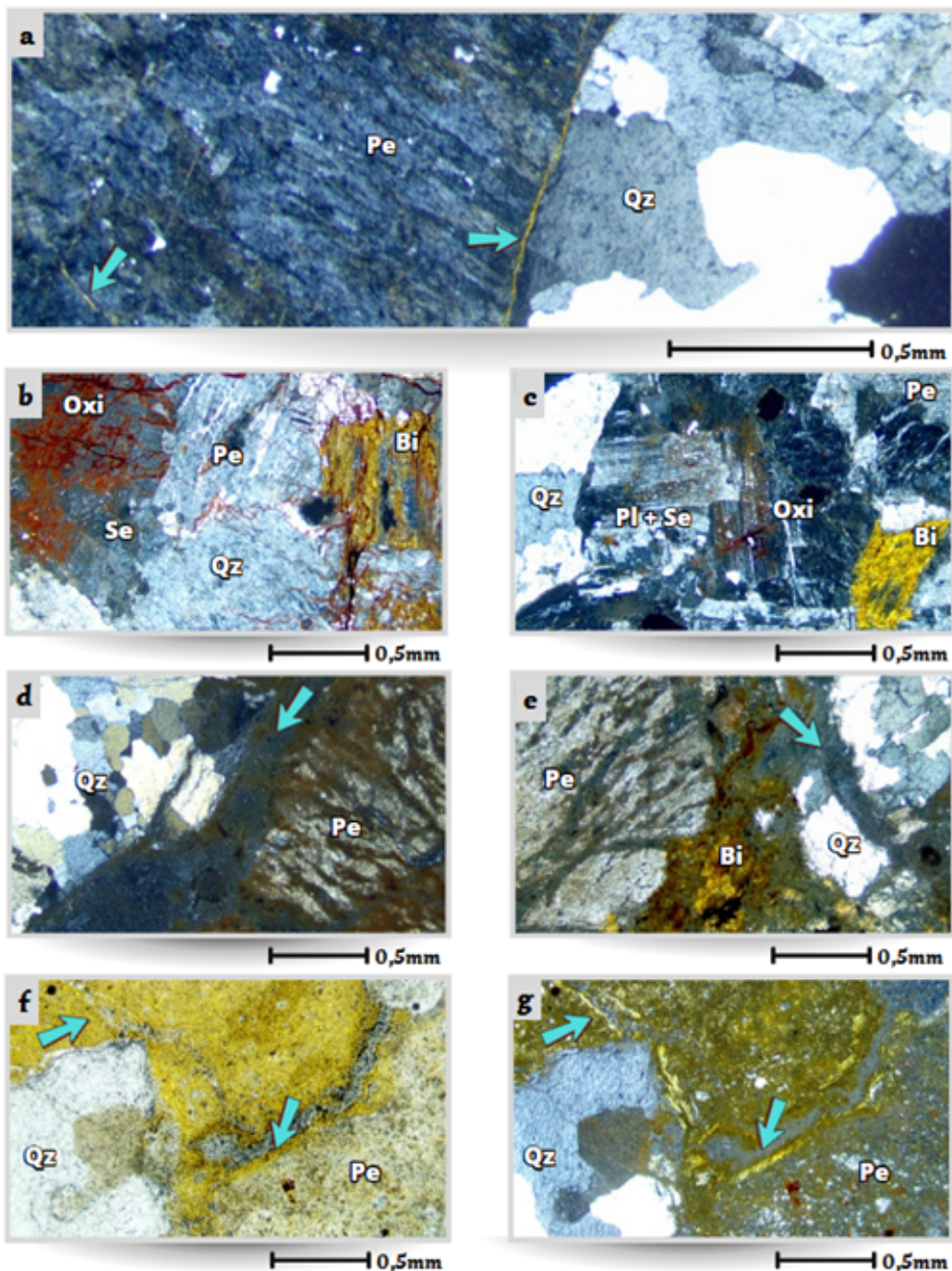
No material lítico, observou-se que o quartzo apresenta granulação média (~1,64 mm), extinção ondulante e contatos suturados, com algumas fraturas internas e discretamente preenchidas por finos, possivelmente argilãs de intemperização (Figura 5a). Os feldspatos alcalinos ocorrem com destaque, incluindo pertitas bem desenvolvidas. Plagioclásios mostram sericitização no núcleo e biotita altera para minerais opacos (Figura 5b-c). A sericitização sugere alteração hidrotermal precoce, possivelmente relacionada a estágios finais da consolidação magmática, conforme interpretado por Aehnelt e Totsche (2025).

Ao longo do saprólito intensificam-se os processos de alteração, aumento das fraturas e seu preenchimento com argilas e óxidos de ferro e avanço do processo de argilização dos feldspatos. A evidente alteração da pertita, a torna acastanhada e pouco nítida ao microscopia ótica a medida que se avança aos horizontes subjacentes, embora eventualmente a fase potássica apareça mais preservada (Figura 5 d-e).

A presença de argilas iluviais, especialmente nas lâminas de Cr2 e Cr1, destaca a translocação de materiais, observada em revestimento em poros, além de preenchimentos densos contínuos em poros e fraturas dos minerais (Figura 5 f-g). No topo do perfil (AC), a alteração mais intensificada e maior presença de finos dificulta a individualização das fases, mas ainda assim, é possível reconhecer remanescentes de biotita em alteração, estruturas que preservam parcialmente o formato original dos minerais e extinções residuais em alguns feldspatos.



FIGURA 5: Fotomicrografias obtidas com luz polarizada transmitida - todas em XPL com exceção de (f) - Em **Camada R**, discretas fraturas preenchidas por material fino (**a**); principais minerais constituintes da assembleia mineralógica do material de origem, com indícios de alteração da biotita e plagioclásios e forte impregnação por óxidos de ferro (**b**) ao logo de fissuras formadas da alteração dos minerais primários (**c**); Em **Hor. Cr4** aumento da porosidade devido fragmentação do material (**d-e**), forte alteração dos minerais primários, destaque para alteração da pertita formando material fino de coloração castanha (**d**) e biotita alterada associada à minerais opacos (**e**); Em **Horz. Cr2** minerais primários já com poucas características distinguíveis, sendo possível observar forte alteração de pertita, e revestimento de argila na porosidade desenvolvida - PPL (**f**); O mesmo que (**f**) mas em XPL (**g**). *Pe = Pertita; Qz = Quartzo; Pl = plagioclásio; Se = Sericita; Oxi = Óxidos; Bi = Biotita; Hor. = Horizonte; PPL = Luz polarizada plana; XPL = Luz polarizada cruzada.*





Aspectos sobre a evolução do perfil

Feições deformacionais visíveis no perfil (falhas/ fraturas e veios) podem indicar a ocorrência de vias preferenciais para circulação de fluidos meteóricos e hidrotermais ao longo da história do regolito. A sericitização observada em plagioclásios da rocha matriz reforça à possibilidade da ação de fluidos hidrotermais (Aehnelt; Totsche, 2025). Essas estruturas podem condicionar a dinâmica de alteração da rocha, como também favorecer processos como argilização, substituição mineral e mobilidade seletiva de elementos.

Essas feições estruturais e alterações iniciais podem criar planos de fraqueza e aumentar a porosidade, promovendo a desagregação inicial do material original (Migon; Thomas, 2002; Irfan, 1996). As análises petrográficas indicam um caminho de alteração progressivo desde a rocha granítica até os horizontes mais superficiais do regolito. A rocha exibe quartzo policristalino com contatos suturados e microfissuras intracristalinas: feições estruturais que podem refletir tensões relacionadas ao resfriamento magmático ou ao fraturamento tectônico, e que podem ter sido posteriormente intensificadas por processos de alteração supergênica. Tais alterações pré-intemperismo meteoricamente ativas tornam o sistema mais suscetível à grusificação e às transformações observadas nos horizontes superiores.

Além disso, a abundância de pertita ao longo do perfil sugere que o material regolítico deriva de uma rocha com expressiva presença de feldspato alcalino, cuja desestabilização progressiva pode estar associada tanto à argilização supergênica quanto à fragmentação física evidenciada pelas microfraturas, características associadas à grusificação (Braga; Paquet; Begonha, 2002; Scarciglia *et al.*, 2016; Popli *et al.*, 2022). Essas fraturas ocorrem sobretudo em cristais de quartzo e feldspatos, muitas vezes preenchidas por argilas ou óxidos, o que pode refletir a atuação de fluidos percolantes em contexto de alteração meteórica.

Essa sobreposição entre esses processos pode ser observada na organização geral do perfil: a intensa fragmentação do material, a presença de horizontes com elevado teor de areia e cascalho (até 88%) e indícios de mobilidade vertical de elementos como Al e K, este último, podendo ser incorporados a illita em condições hidrotermais ou iluviais (Kanhayia *et al.*, 2023; Scarciglia *et al.* 2016).

A redução dos teores de Na_2O ao longo do perfil regolítico em relação à rocha, com valores nulos nos horizontes subjacentes, conforme evidenciado pelas análises de FRX, indica a degradação progressiva dos minerais ricos em sódio que tende a ser removido por intemperismo químico, (Kanhayia *et al.*, 2023; Scarciglia *et al.*, 2016). Essa tendência está em consonância com os valores elevados dos índices geoquímicos de alteração (CIA, CIA-K e PIA), que refletem a remoção de álcalis e alcalino-terrosos



da estrutura mineral e o consequente enriquecimento relativo de Al_2O_3 . No entanto, os valores relativamente elevados de sódio trocável (PST > 10%), sobretudo nos horizontes Cr2, Cr3 e Cr4, sugerem que parte do sódio liberado permanece retido na fase coloidal do solo, enquanto grande parte dos demais cátions básicos foram lixiviados.

Valores elevados de PST podem influenciar à dispersão das argilas, prejudicando a estrutura dos solos, além de facilitar a translocação de material fino para zonas mais profundas. Quanto a isso, chama-se atenção presença abundante de feições de iluviação de argilas nos horizontes Cr1 e Cr2, observadas como revestimento de poros e fissuras com materiais finos e de coloração distinta. Tais horizontes demonstram inclusive incremento de argila em relação aos horizontes sobrejacentes, de acordo com as análises granulométricas. Apesar desses horizontes serem apédicos, tais evidências indicam a atuação de processos pedogenéticos ainda na fase de desenvolvimento no saprólito.

Essa sobreposição entre alteração mineral e mobilidade de materiais finos também foi relatada por Scarciglia *et al.* (2016), que observaram argilas iluviais já presentes em horizontes C, bem como por Popli *et al.* (2022), que relacionam os índices geoquímicos e a reorganização do material fino à formação progressiva de feições pedogenéticas na transição saprolito–solo. Dessa forma, os valores elevados de CIA observados nos horizontes Cr1 e Cr4 (respectivamente associados à presença de argilas iluviais e ao aumento de Al_2O_3) podem refletir não apenas o grau de intemperismo, mas também a mobilidade vertical da fração argilosa (mais intemperizada) e de elementos como o potássio (fenômenos associados à pedogênese). Essa limitação já havia sido apontada por Santos *et al.* (2022) e Nesbitt *et al.* (1997), que ressaltam que o CIA tende a ser influenciado por processos pedogenéticos, sendo mais sensível à migração e acúmulo de argilas do que ao intemperismo primário do regolito.

Os resultados demonstraram que os valores de CIA-K foram ligeiramente mais elevados que os de CIA, mas mantiveram a mesma tendência vertical, com os maiores valores também nos horizontes Cr1 e Cr4 (CIA-K = 99), em contraste com os horizontes superiores A e C (CIA-K = 96 e 95). Isso reforça a interpretação de que esses horizontes intermediários passaram por maior degradação de minerais primários, e/ou processos pedogenéticos, associados à translocação de argila, também possam ter contribuído para o enriquecimento relativo de alumínio (e empobrecimento relativo de sílica) resultando no aumento dos índices geoquímicos (Le Pera *et al.*, 2001; Sheldon; Tabor, 2009).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de pouco desenvolvido do ponto de vista pedogenético, por apresentar baixa horizonção e nenhum horizonte diagnóstico subsuperficial, o perfil encontra-se



intensamente intemperizado. Isso é evidente ao observarmos os índices de intemperismo da sequência de horizontes, comparando-os com o material de origem, assim como os valores obtidos para o complexo sortivo. Essa dissonância pode indicar que os processos de alteração são antigos, do ponto de vista cronológico, mas não foram suficientes para que houvesse expressivo desenvolvimento do *solum*. Sobre isso, pode-se supor que as taxas de remoção sejam superiores ao acúmulo, algo indicado pelo incremento de sílica (e areia) nos horizontes superficiais em decorrência da perda de finos (silte e argila). Essa remoção seletiva não ocorreria necessariamente por processos de erosão, pois, apesar da acentuada declividade do local, há grande cobertura vegetal. Os processos dominantes são, portanto, de translocação vertical-lateral, evidenciados pelas feições de iluviação nos horizontes intermediários (Cr1 e Cr2). Pode-se supor que a combinação das características topográficas aos valores elevados de PST, que favorecem a dispersão das argilas, dificultem a formação de estruturas pedogenéticas. A remoção prolongada do material, pouco agregado, favoreceria ao longo do tempo geológico a exposição dos *bolders* formados no interior dos perfis, que poderia ser inclusive, influenciada pelos processos tectônicos observados na área de estudos, devido a criação de via preferencias para circulação de fluidos ao longo dos planos de falha e fraturas. Tais processos indicam um sistema complexo, em que eventos estruturais podem ter sobreposto em diferentes graus, os processos pedogenéticos e intempéricos atuantes, compondo um modelo de evolução policíclico e espacialmente heterogêneo.

Agradecimentos:

Os autores agradecem aos colegas de laboratório Tatiana César e César Farias pelas valiosas contribuições e discussões que auxiliaram a interpretação dos dados, e a Natan Pinheiro para contribuição nas atividades de campo. Este trabalho contou com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo nº 2024/01524-8). FSBL agradece ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo nº 303977/2021-3).



REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. A geomorfologia do estado de São Paulo. In: CONSELHO NACIONAL DE GEOGRAFIA (Brasil). **Aspectos geográficos da Terra Bandeirante**. Rio de Janeiro: IBGE, 1954. p. 1–97.
- AB'SÁBER, A. N. A transição entre o Carbonífero e o Criptozoico na região de Itu. **Mineração e Metalurgia**, v. 12, n. 71, p. 221-223, 1948.
- AEHNELT, M.; TOTSCHKE, K. U. From rock to soil: Saprock genesis and its legacy for subsoil structure and micro-aggregate formation during pedogenesis. **Geoderma**, v. 459, p. 117356, 2025.
- ALMEIDA, F. F. M. A “roche moutonnée” de Salto, Estado de São Paulo. **Boletim de Geologia e Metalurgia**, v. 5, p. 112–118, 1948.
- BIRD, D. K.; SPIELER, A. R. Epidote in geothermal systems. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 56, n. 1, p. 235–300, 2004.
- BRAGA, M. A. S.; PAQUET, H.; BEGONHA, A. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization. **Catena**, v. 49, n. 1–2, p. 41–56, 2002.
- BUTT, C. R. M.; SCOTT, K. M.; CORNELIUS, M.; ROBERTSON, I. D. M. Regolith sampling for geochemical exploration. In: SCOTT, K. M.; PAIN, C. F. (org.). **Regolith Science**. Collingwood: CSIRO Publishing, 2009. p. 341–376.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. 2009. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo. 77 p. (Boletim técnico, 106)
- CARNEIRO, Celso C. Dal D. Ré. Os “fundamentos geológicos do relevo paulista” nos dias atuais. *Revista do Instituto Geológico*, v. 39, n. 3, 2018.
- CASTRO, S. S.; COOPER, M. **Fundamentos de micromorfologia de solos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.
- EVANS, C. V.; BOTHNER, W. A. Genesis of altered Conway granite (grus) in New Hampshire, USA. **Geoderma**, v. 58, n. 3–4, p. 201–218, 1993.
- FEDO, C. M.; NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Unraveling the effect of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. **Geology**, v. 23, p. 921–924, 1995.
- HARNOIS, L. (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. **Sediment Geol** 55(3):319–322.
- IRFAN, T. Y. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 29, n. 1, p. 5-35, 1996.
- KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 207-240.
- KANHAIYA, S.; SINGH, B. P.; MITTAL, P.; PATRA, A. Regolith profiles developed from a granitic parent rock in a sub-humid climate: implications for pedogenesis and chemical mobility of elements. **Journal of Sedimentary Environments**, v. 9, n. 1, p. 63–79, 2024.
- LE PERA, E.; CRITELLI, S.; SORRISO-VALVO, M. Weathering of gneiss in Calabria, Southern Italy. **Catena**, v. 42, n. 1, p. 1–15, 2001. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00117-X.
- MELFI, A. J.; CERRI, C. C.; KRONBERG, B. I.; FYFE, W. S.; MCKINNON, B. Granitic weathering: a Brazilian study. **Journal of Soil Science**, v. 34, p. 841–851, 1983. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1983.tb01076.
- MIGON, P. Palaeoenvironmental significance of grus weathering profiles: a review with special reference to northern and central Europe. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 108, n. 1, p. 57–70, 1997.
- MIGON, P.; THOMAS, M. F. Grus weathering mantles—problems of interpretation. **Catena**, v. 49, n. 1–2, p. 5–24, 2002.
- NESBITT, H. V.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, v. 299, p. 715–717, 1982.



NESBITT, H. Wayne; MARKOVICS, G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, n. 8, p. 1653-1670, 1997.

NEVES, M. A. **Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP)**. 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

PERRI, F. Chemical weathering of crystalline rocks in contrasting climatic conditions using geochemical proxies: an overview. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 556, p. 109873, 2020.

POPLI, C.; SINGH, S.; RANI, N.; KUMAR, P. Role of endogenic and exogenic processes in the grusification and pedogenesis of weathered mantle, Precambrian granite of Dharwar Craton (India). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, n. 18, p. 1502, 2022.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI M., A. Guia de interpretação de análise de solo e foliar. Vitória, ES: Incaper, 2013. 104 p. Disponível em: <<http://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/40/1/Guia-interpretacao-analise-solo.pdf>>. Acesso em jul 2025.

PRICE, J. R.; VELBEL, M. A. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. **Chemical Geology**, v. 202, p. 397–416, 2003. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2002.11.001.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

SACHS, L. L. B.; MORAIS, S. M. Integração geológica da folha São Paulo SF.23-Y-C: escala 1:250.000: estado de São Paulo: nota explicativa. São Paulo: CPRM, 1999.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, J. C. B.; BATISTA, I.; PESSOA, L. G. M.; FERNANDES, N. F. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 683–696, 2012.

SANTOS, J. C. B.; OLIVEIRA, C. S.; LE PERA, E.; SARTOR, L. R.; CORRÊA, M. M.; SILVA, A. H. N.; SANTOS, R. A.; SILVA, L. F. V.; MÜLLER, C. R.; AZEVEDO, A. C. Saprolithology applied to pedology: Mineral alteration in soil–saprolite profiles along a climate gradient in Triunfo Massif (NE Brazil). **Catena**, v. 213, e106214, 2022a. DOI:

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7a Edição. Viçosa: SBCS, 2015.

SCARCIGLIA, F.; CRITELLI, S.; BORRELLI, L.; CONIGLIO, S.; MUTO, F.; PERRI, F. Weathering profiles in granitoid rocks of the Sila Massif uplands, Calabria, southern Italy: New insights into their formation processes and rates. **Sedimentary Geology**, v. 336, p. 46–67, 2016.

SHELDON, N. D.; TABOR, N. J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. **Earth-Science Reviews**, v. 95, n. 1–2, p. 1–52, 2009.

TARDY, Y.; BOCQUIER, G.; PAQUET, H.; MILLOT, G. Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography. **Geoderma**, v. 10, p. 271–284, 1973.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa. 573p. 2017.



AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CÁDMIO, ZINCO E NÍQUEL EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO CERRADO BRASILEIRO*

*Resultado de projeto de pesquisa financiando pelo CNPq e FAPEG

João Batista Pereira Cabral **1**

Fernanda Luísa Ramalho **2**

Izabella Borges Rodrigues Costa **3**

Assunção Andrade de Barcelos **4**

Patrícia da Silva Gomes **5**

PALAVRAS-CHAVE: Solos, Cerrado e Elementos Potencialmente Tóxicos.

RESUMO

As mudanças no uso da terra têm se intensificado no bioma Cerrado brasileiro, mas ainda persistem lacunas na compreensão de seus impactos sobre a contaminação do solo, especialmente em relação aos elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Solos contaminados representam riscos relevantes à saúde pública e aos ecossistemas. Em resposta a esse cenário, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução nº 420/2009, estabelecendo valores orientadores para o monitoramento de EPTs em solos. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar os teores de cádmio (Cd), níquel (Ni) e zinco (Zn) nos solos da bacia do rio Bonito, localizada no sudoeste de Goiás, e inferir os níveis de contaminação com base em valores de referência e em índices de avaliação geoquímica. Foram coletadas quinze amostras de solo na camada superficial (0–20 cm), em áreas sob uso de pastagem e vegetação nativa (Cerrado). As análises foram conduzidas em triplicata, com uso de amostras certificadas (NIST SRM 2709a e 2710a) e amostras em branco para controle de qualidade. As determinações analíticas foram realizadas por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), com limites de quantificação de 0,002 mg L⁻¹ para Cd, 0,007 mg L⁻¹ para Ni e 0,002 mg L⁻¹ para Zn. A análise granulométrica indicou predomínio da fração areia (variação de 23,58% a 87,56%), seguida por silte (6,95% a 56,76%) e argila (4,71% a 20,58%). O pH do solo variou de 4,68 a 7,19, indicando acidez moderada a alta, enquanto os teores de matéria orgânica (MO) oscilaram entre 5,21 e 21,68 g kg⁻¹. As concentrações de Ni (média de 5,88 mg kg⁻¹) e Zn (média de 17,68 mg kg⁻¹) permaneceram

- 1** Prof. Dr. Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Jataí- UFJ cabral@ufj.edu.br
- 2** Pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Jataí- UFJ ramalho_luisa@hotmail.com
- 3** Discente do curso de Geografia da Universidade Federal de Jataí- UFJ izabella.costa@discente.ufj.edu.br
- 4** Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Jataí- UFJ assuncaoa-barcelos@hotmail.com
- 5** Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Jataí- UFJ paty00sg@gmail.com



abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009. No entanto, o Cd apresentou valores superiores ao Valor de Investigação ($VI = 3,0 \text{ mg kg}^{-1}$) em seis pontos de amostragem, com destaque para o ponto 7, que atingiu $13,52 \text{ mg kg}^{-1}$. Os índices de geoacumulação (Igeo) e fator de contaminação (CF) confirmaram níveis elevados de contaminação por Cd, classificados como “muito alta contaminação” ($CF > 6$) e “extremamente contaminado” ($Igeo > 5$), sugerindo forte influência antrópica, possivelmente relacionada ao uso intensivo de fertilizantes fosfatados. Os resultados reforçam a necessidade de programas de monitoramento ambiental contínuo e de políticas públicas que promovam o uso e o manejo sustentável dos solos do Cerrado.

INTRODUÇÃO

O Cerrado, com seus cerca de 2 milhões de km^2 , é reconhecido como um *hotspot* global de biodiversidade, abrigando mais de 4.800 espécies de vertebrados e plantas (Strassburg et al., 2017; Françoso et al., 2020). Nas últimas décadas, a expansão da fronteira agrícola converteu extensas áreas deste bioma em monoculturas e pastagens, promovendo uma redução estimada de quase 50% da vegetação nativa (Lewis et al., 2022; Song et al., 2021; Silva & Lacher, 2020). Essa transformação tem contribuído significativamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa e a intensificação da perda de biodiversidade (Ramesh et al., 2019; Siqueira-Neto et al., 2021; Colman et al., 2024).

Estudos recentes demonstram que os sistemas de manejo intensivo do solo, característicos da agricultura moderna, alteram profundamente os atributos físico-químicos e biológicos dos solos, reduzindo sua capacidade de sustentar processos ecológicos e comprometer a segurança alimentar por meio da incorporação de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) na cadeia trófica (Lehmann et al., 2020; Elbehiry et al., 2021; Bueno Guerra et al., 2023). A poluição do solo por EPTs tornou-se uma das maiores preocupações em relação à sustentabilidade da produção agrícola, sobretudo em regiões tropicais, onde solos com origem geológica rica em metais já apresentam concentrações naturalmente elevadas (FAO & UNEP, 2021; Gu et al., 2014; Vinhal-Freitas et al., 2017).

Esse cenário é agravado pelo uso intensivo de fertilizantes e pesticidas, aliado à irrigação com água contaminada, que elevam os teores de metais pesados no ambiente, com destaque para Cd, Pb, As, Cr, Ni e Hg, elementos que apresentam alta toxicidade e persistência ambiental, colocando em risco a saúde pública e os ecossistemas (Rashid et al., 2023).

O processo de intensificação do uso das terras do Cerrado remonta à década de 1970, quando políticas públicas voltadas ao desenvolvimento agrícola, como os programas POLOCENTRO, PRODECER, Proálcool e, mais recentemente, o Plano



Nacional de Agroenergia (PNA), incentivaram a conversão de áreas naturais em regiões produtivas (Barbalho et al., 2013; Hunke et al., 2015; Silveira et al., 2019). Esse modelo de ocupação territorial, fortemente baseado na supressão da vegetação nativa e no uso de insumos químicos, acentuou a degradação ambiental e a contaminação dos recursos naturais (Maciel, 2008; Cabral et al., 2023).

Apesar dos avanços no reconhecimento da heterogeneidade ambiental do Cerrado (Silva et al., 2009; Silveira et al., 2019), persistem lacunas em relação ao monitoramento e conservação dos solos. A intensificação da agricultura e da urbanização tem resultado na perda de biodiversidade, fragmentação de habitats e degradação dos serviços ecossistêmicos, impactando diretamente os recursos hídricos e a fertilidade dos solos (Duarte e Leite, 2020; Santos e Faria, 2020; Maciel et al., 2023).

A dinâmica dos EPTs nos solos do Cerrado é regida por diversos fatores físico-químicos e biogeoquímicos. Esses elementos apresentam comportamento não degradável, são acumulativos, bioacumuláveis e potencialmente tóxicos, mesmo em concentrações relativamente baixas (Alloway, 2013; Longo et al., 2020). Embora alguns EPTs ocorram naturalmente devido à litogênese e à pedogênese, seus teores são significativamente ampliados por atividades antrópicas, como o uso excessivo de defensivos agrícolas, efluentes industriais, deposição atmosférica e irrigação com águas contaminadas (Kabata-Pendias, 2010; Patinha et al., 2017; Xiao et al., 2019).

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 420/2009 estabeleceu diretrizes para avaliar a contaminação do solo por EPTs, indicando a necessidade de que cada estado defina seus Valores de Referência de Qualidade (VRQs), com base nas condições pedológicas e geoquímicas regionais (Paye et al., 2010; Preston et al., 2014). Contudo, mesmo com a publicação da Resolução CONAMA nº 460/2013, que fixava o prazo de 2014 para a efetivação dos VRQs estaduais, muitos entes federativos ainda não regulamentaram seus valores. No Centro-Oeste, embora Mato Grosso e Mato Grosso do Sul já tenham avançado, o estado de Goiás ainda carece de estudos específicos que subsidiem tal normatização (Santos, 2011; Cabral et al., 2024; Batista & Cabral, 2023; Metri Correa et al., 2024).

A falta de VRQs locais dificulta a interpretação adequada dos níveis de contaminação do solo, limitando ações corretivas e preventivas por parte dos órgãos ambientais. Diante da intensificação das atividades agroindustriais, torna-se fundamental realizar diagnósticos regionais que orientem o planejamento territorial e a gestão ambiental (Annammla et al., 2021; Justus Reymond & Susalaimuthu, 2023). Em particular, os estudos em bacias hidrográficas são essenciais para mapear os impactos acumulativos e propor medidas eficazes de mitigação (Sojka et al., 2022a; 2022b; Cabral et al., 2023).



Diversas pesquisas apontam os efeitos tóxicos dos EPTs sobre plantas, animais e seres humanos, com impactos que variam de distúrbios metabólicos e degenerativos à ocorrência de doenças crônicas e cânceres. Elementos como Zn, Pb e Cd são exemplos de contaminantes que afetam diretamente a fisiologia vegetal e humana, podendo causar desde estresse oxidativo em plantas até doenças respiratórias e cardiovasculares em humanos (Fan et al., 2022; Soares et al., 2022; Wu et al., 2022; Ahmed et al., 2022; Zhang & Wang, 2020; Shi et al., 2022).

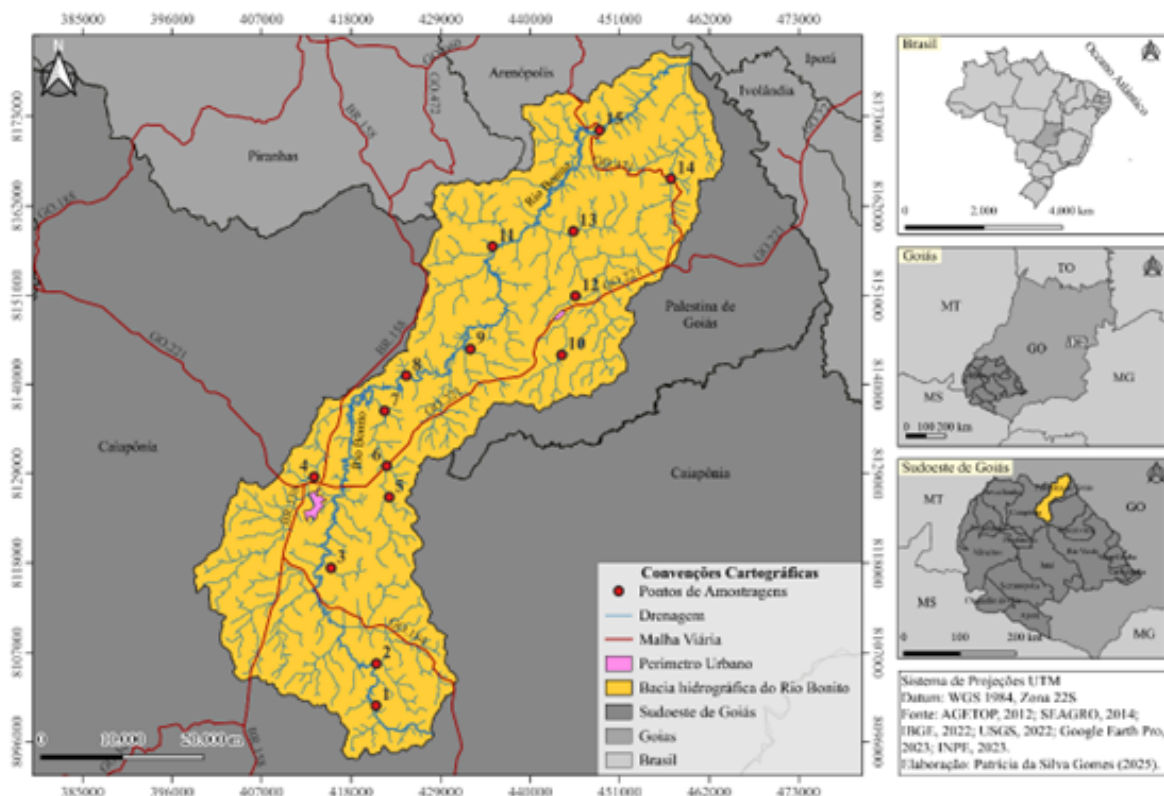
Nesse contexto, o monitoramento dos EPTs no solo é uma ferramenta estratégica para a avaliação da qualidade ambiental e dos riscos à saúde pública. Com base nos pressupostos, o presente artigo tem por objetivo avaliar a concentração dos EPTs nos solos do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Bonito - GO, e inferir sobre os níveis de contaminação.

METODOLOGIA.

Localização e Caracterização da área de estudo

A bacia do rio Bonito possui uma área de drenagem de 2,017 km², localizada na parte Sudoeste do estado de Goiás, entre os municípios de Arenópolis, Caiapônia e Palestina de Goiás, delimitada entre as coordenadas 17°02'46.84"S / 51°56'56.21"O e 16°28'0.04"S / 16°28'0.04"S, integrando a bacia do rio Caiapó, afluente da bacia hidrográfica do rio Araguaia/Tocantins/Brasil (Figura 1).

FIGURA 1: localização da área de estudo.





A referida bacia caracteriza-se por superfícies planas/suave onduladas a fortemente onduladas, em altitudes entre 442 e 1047 metros, e com um comprimento de 178,6 km. A área tem como principal atividade econômica a agropecuária, ocupando 27% da área total da referida bacia. A prática agrícola é destinada à plantação de lavouras, como a soja, sorgo e milho, que ocupam 18% da área de estudo, e a cobertura vegetal original do Bioma Cerrado, correspondente a 32% da área total da bacia (PEREIRA e MARTINS, 2022).

Na bacia, ocorrem os seguintes solos: Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho-Amarelo Distroférrico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Argissolo Vermelho Eutrófico, Neossolo Litólico Eutrófico, Neossolo Quartzarênico Órtico e Cambissolos (SANTOS et al., 2018).

Análise quali/quantitativa dos solos

Foram selecionados 15 pontos para coleta de solos na área de estudo, previamente definidos por meio de imagens de satélite, de modo a abranger setores distintos. A coleta foi realizada em 22 de janeiro de 2019, período de altos índices de chuvas para o Cerrado brasileiro. Utilizou-se um trado Holandês galvanizado, nas profundidades 0 - 20cm. Todas as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas para posterior preparo das amostras e análise dos EPTs cádmio (Cd), zinco (Zn) e níquel (Ni) conforme os procedimentos descritos por Filizola, Gomes e Souza (2006).

Foram macerados, em pistilo de ágata, 5 gramas de solos. Transferiu-se 0,250 g das amostras peneiradas em malha de 100 mesh para tubos de teflon, em que foram adicionados 5 mL de HNO_3 (65%) concentrado e de pureza analítica. As amostras foram mantidas em sistema fechado - forno de micro-ondas (Mars Xpress, CEM Corporation) por 4'30", à temperatura de 175 °C, depois da passagem pela rampa de temperatura. Após resfriamento, as amostras foram completadas com água ultrapura e os extratos filtrados em papel filtro qualitativo de 80g.

As análises foram realizadas em triplicatas e, paralelamente, foram feitas provas em branco. O controle de qualidade da análise foi realizado utilizando solos certificados (NIST SRM 2709a San Joaquin soil e 2710a Montana I Soil).

A análise quantitativa e qualitativa dos solos foi realizada conforme os valores determinados pelos Valores de Referência de Qualidade (VRQ) da Cetesb (2014) e Resolução CONAMA n° 420, de 2009, a qual estabelece diretrizes para avaliar a qualidade e quantidade de EPTs permitidos, para que não sejam prejudiciais ao ambiente e ao ser humano, estabelecendo limites, conforme a Tabela 1.



TABELA 1: Valores orientadores das EPTs presentes nos solos conforme a resolução CONAMA n. 420/2009 e Cetesb (2016)

Referências de qualidade (mg kg ⁻¹)	Elementos Potencialmente Tóxicos		
	Cd	Ni	Zn
Valores de referência de qualidade – VRQ	< 0.5	13	60
Valor de prevenção – VP	1.3	30	300
Valor de investigação – VI	3	70	450

FONTE: Cetesb (2016) e CONAMA n° 420/2009.

O VRQ representa a medida da concentração natural de elementos químicos em solos sem influência humana e serve como base de referência para os órgãos ambientais estaduais monitorarem os níveis de contaminação dos solos (CETESB, 2014).

O valor de prevenção (VP) é definido como a concentração de valor limite de determinada substância no solo, que ainda permite a manutenção de suas funções primordiais. Este valor indica um ponto a partir do qual as funções primárias do solo ficarão comprometidas no que diz respeito à biota dos solos (CONAMA n. 420/2009).

O valor de investigação (VI) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado (CONAMA n. 420/2009). Quando os valores dos EPTs ultrapassam o VI, a área será enquadrada como contaminada sob investigação e deverá seguir os procedimentos do gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 2014).

Como o estado de Goiás ainda não possui nenhum dado para os valores orientadores de contaminação dos solos por EPTs em relação aos valores de referência de qualidade (VRQ), para fins comparativos, foram utilizados os valores orientadores (quadro 1) segundo as normativas publicadas para solos (mg kg⁻¹) do estado de São Paulo (CETESB, 2014)

Para avaliar o grau de contaminação dos solos por EPTs foi utilizado o Igeo conforme a proposta de Müller (1969). Para tanto, aplica-se a Equação 1.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

C_n: concentração do elemento na fração fina do sedimento a ser classificado;

B_n: é a concentração média de “background” geoquímico do elemento;

1,5: fator de correção para possíveis variações do “background” causado por diferenças litológicas/pedológicas.



Considerando o *Igeo*, o solo estudado pode ser classificado em sete níveis ou classes que varia de praticamente não poluído ($Igeo \leq 0$) a extremamente poluído ($Igeo > 5$) (MÜLLER, 1969; LOSKA, WIECHUŁA, KORUS, 2004; REIS et al 2020).

A avaliação da contaminação do solo também pode ser realizada utilizando-se o CF proposto por Hakanson (1980). Este modelo permite estimar a contribuição antrópica dos metais nos solos, definindo a relação entre a concentração do metal nos solos e o seu nível de concentração natural ou background nos solos (BRITO et al 2020. KOWALSKA, et al 2020). Para obtenção da seguinte proposta, segue-se a Equação 2:

$$CF = C_n / C_{Bn} \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

CF = Fator de contaminação;

C_n = Concentração (mg/kg) do metal “n”;

C_{Bn} = Concentração do metal “n” do background.

Os CF foram interpretados de acordo com a proposta de Hankanson (1980) onde: $CF < 1$ baixa contaminação, $CF > 6$ indicam áreas com contaminação alta. O CF é um fator importante para que seja feita a estimativa do índice de carga poluente (Index load pollution - PLI) desenvolvido por Tomlinson et al (1980).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações EPTs e as características físico-químicos dos solos estudados são apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2: Características físico-química das amostras de solos analisadas.

Pontos	Uso	pH	Zn	Cd	Ni	M.O	Areia	Argila	Silte
			-----mg kg ⁻¹ -----			g/kg	-----%-----		
1	Cerrado	6,14	14,36	1,30	4,55	5,21	87,56	5,49	6,95
2	Pastagem	4,99	9,49	1,13	5,19	14,00	54,40	13,82	31,78
3	Vegetação Secundária	5,1	9,69	1,99	4,67	12,25	74,96	11,51	13,53
4	Pastagem	6,11	9,80	1,98	3,94	14,77	76,01	12,89	11,10
5	Cerrado	4,94	5,16	0,62	2,97	8,56	79,41	8,53	12,06
6	Agricultura	5,02	21,01	7,38	8,12	19,41	23,58	19,66	56,76
7	Vegetação Secundária	4,82	36,31	13,52	11,62	15,94	62,15	11,48	26,37
8	Agricultura	7,19	25,55	4,60	6,57	10,00	83,18	4,71	12,11
9	Pastagem	5,58	16,47	3,54	5,88	21,68	56,57	20,39	23,04
10	Pastagem	4,68	20,57	3,71	5,23	10,74	79,32	12,42	8,26
11	Agricultura	5,04	32,44	5,70	7,46	19,31	80,86	9,72	9,42
12	Mata ciliar	5,55	10,08	1,43	5,16	20,36	53,13	18,65	28,22
13	Mata ciliar	5,72	14,30	2,15	6,79	9,34	64,50	19,38	16,12
14	Pastagem	5,11	8,08	0,27	2,61	13,62	42,29	20,58	37,13
15	Planície de Inundação	5,38	9,72	0,45	1,62	9,50	75,33	16,04	8,63
Valor de referência		Valor de prevenção			Valor de investigação		Contaminado		

LEGENDA: pH (Potencial Hidrogeniônico); M.O (Matéria Orgânica).



De acordo com os dados obtidos, os solos da bacia do rio Bonito apresentam predominância de textura arenosa, com teores de areia variando entre 23,58% e 87,56%, seguidos por argila (4,71% a 20,58%) e silte (6,95% a 56,76%), conforme os resultados apresentados na Tabela 2. O predomínio da fração areia está associado aos processos intempéricos que atuam sobre rochas sedimentares das formações geológicas Cachoeirinha, Aquidauana, Irati, Corumbataí, Ponta Grossa, Furnas e Botucatu, que conferem características texturais típicas aos solos da região. Além disso, a presença de Latossolos, Argissolos e Cambissolos, comuns nas bacias do sudoeste de Goiás, está ligada ao intemperismo de rochas basálticas da Formação Serra Geral e arenitos dessas mesmas unidades (Rocha et al., 2025).

Os valores de pH dos solos variaram de 4,68 a 7,19, com média de $5,47 \pm 0,67$, indicando predominantemente uma acidez de moderada a elevada, conforme a classificação de Raij et al. (1997). As áreas agrícolas mostraram tendência de pH mais elevados (entre ácido e neutro), o que pode ser atribuído à prática da calagem, comumente empregada para corrigir a acidez do solo e favorecer o desenvolvimento das culturas (Sanchez, 2019; Brito et al., 2020).

A M.O apresentou variação entre 5,21 e 21,68 g/kg, com média de $13,33 \pm 4,91$ g/kg, valores considerados moderados, mas que evidenciam impacto do uso do solo, especialmente nas áreas sob pastagem intensiva. A relação entre M.O e acidez é relevante, uma vez que a decomposição da matéria orgânica libera ácidos orgânicos no solo, influenciando diretamente os valores de pH (Mccauley et al., 2009).

Em relação aos EPTs, observou-se a seguinte ordem decrescente das concentrações médias: Zn ($17,68 \text{ mg kg}^{-1}$) > Ni ($5,88 \text{ mg kg}^{-1}$) > Cd ($3,34 \text{ mg kg}^{-1}$). As concentrações máximas foram de $36,31 \text{ mg kg}^{-1}$ para Zn (ponto 7), $13,52 \text{ mg kg}^{-1}$ para Cd (ponto 7) e $11,62 \text{ mg kg}^{-1}$ para Ni (também no ponto 7). Essas concentrações, embora em média estejam abaixo dos valores de prevenção (VP) definidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 — Zn (300 mg kg^{-1}) e Ni (30 mg kg^{-1}), evidenciam excedências pontuais no caso do Cd, com valores acima até mesmo do Valor de Investigação (VI = $3,0 \text{ mg kg}^{-1}$) em seis pontos de amostragem (6 a 11), caracterizando essas áreas como contaminadas, conforme a normativa ambiental. A distribuição dessas concentrações ao longo da bacia sugere influência direta do uso da terra, principalmente em áreas agrícolas. A presença de valores elevados de Cd pode ser associada ao uso intensivo de fertilizantes fosfatados e corretivos agrícolas, que são fontes potenciais desses elementos (Kabata-Pendias, 2010; Rashid et al., 2023), como mostra a Figura 2 no ponto 7, uma vegetação



secundária e envolta a prática do uso agrícola que pode estar impactando área devido ao efeito de borda. A variabilidade entre os pontos reforça a importância de abordagens espaciais e temporais na análise de risco ambiental.

FIGURA 2: Área de amostragem do ponto 7.

A – Vegetação secundária



B – Imagem de satélite demonstrando o uso da terra pela prática agrícola



ORG.: Próprios autores (2025).

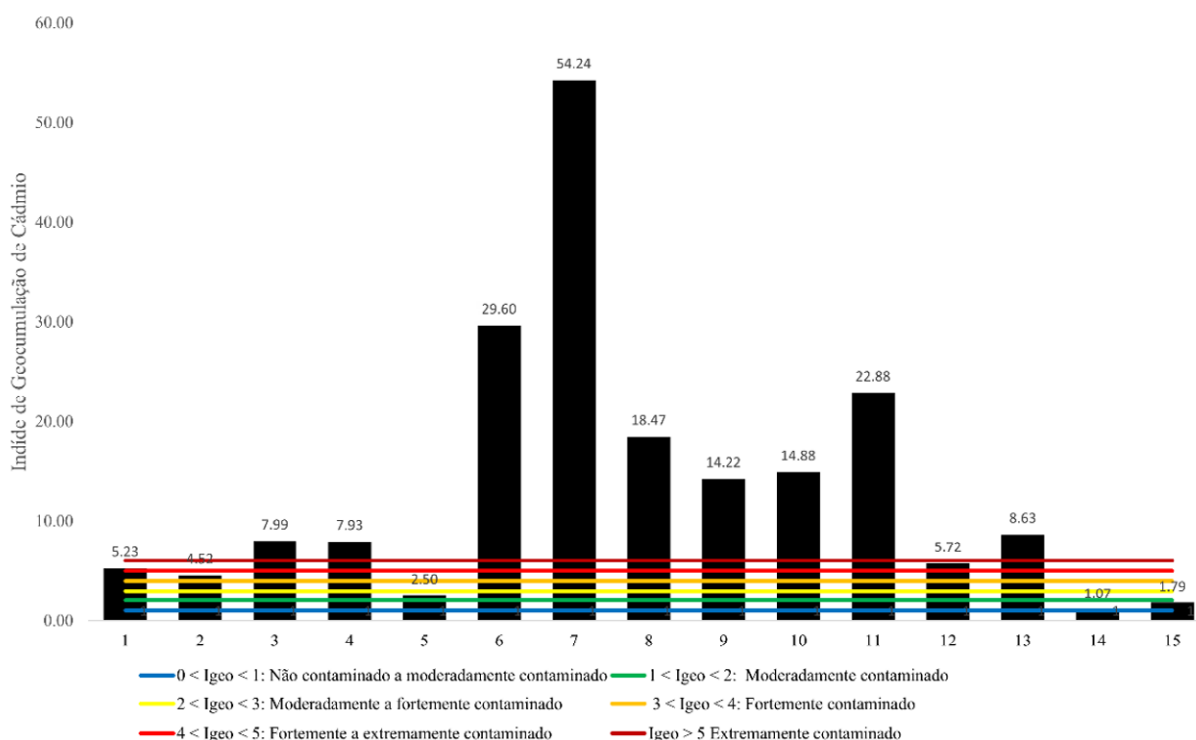
A persistência desses elementos, especialmente Cd, que não é essencial às plantas e apresenta alta toxicidade, representa riscos à biota terrestre e aquática, podendo afetar negativamente a saúde humana por meio da cadeia alimentar (Alloway, 2013; Ahmed et al., 2022; Wu et al., 2022). Já o Ni, apesar de ser um micronutriente em pequenas concentrações, pode causar efeitos adversos quando em níveis acima dos tolerados pelas plantas (Fan et al., 2022). O Zn, embora essencial, pode também provocar toxicidade vegetal e comprometer funções metabólicas quando acumulado em excesso (Soares et al., 2022).

Portanto, a presença de Cd em níveis muito acima dos VRQs reforça a necessidade de políticas públicas voltadas ao monitoramento contínuo e à definição de diretrizes específicas para o estado de Goiás, que ainda não estabeleceu seus valores de referência conforme previsto na Resolução nº 420/2009 (Batista & Cabral, 2023; Metri Correa et al., 2024). Essa lacuna regulatória limita a atuação de órgãos ambientais estaduais na prevenção e remediação de áreas contaminadas.

A avaliação do índice de geoacumulação (Igeo), para os elementos Cd, Ni e Zn revelou distintos níveis de contaminação nos solos da bacia hidrográfica estudada. O cádmio (Cd) (Figura 3) apresentou os valores mais elevados, com Igeo médio de $5,21 \pm 1,31$, o que enquadra parte dos pontos analisados como extremamente contaminados (Igeo > 5), segundo os critérios propostos por Müller (1969).



FIGURA 3: Classificação qualitativa do cádmio segundo o Índice de Geoacumulação.



ORG.: Próprios autores (2025).

Essa classificação indica forte influência antrópica, sobretudo em pontos localizados em áreas sob uso agropecuário intensivo. O elevado Igeo para Cd corrobora os dados de concentração registrados na Tabela 2, com destaque para o ponto 7 ($13,52 \text{ mg kg}^{-1}$), que excede amplamente o Valor de Investigação (VI) da Resolução CONAMA nº 420/2009 ($3,0 \text{ mg kg}^{-1}$). A presença desses valores sugere associação direta com o uso recorrente de fertilizantes fosfatados e corretivos agrícolas, reconhecidos como fontes difusas de cádmio em sistemas agrícolas. Estudos anteriores demonstram que solos não impactados geralmente apresentam teores de $\text{Cd} \leq 1 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto atividades humanas podem elevar essas concentrações em até uma ordem de magnitude (Quevedo & Menezes, 2014; Colzato, 2016; Castro-González et al., 2019). Tais achados reforçam a urgência de ações de controle e monitoramento da qualidade do solo em áreas agrícolas do Cerrado.

O níquel (Ni) e o zinco (Zn), por sua vez, apresentaram valores médios de Igeo significativamente mais baixos, variando dentro da faixa de não contaminado a moderadamente contaminado ($0 < \text{Igeo} \leq 1$). Essa classificação sugere que as concentrações desses dois elementos não representam risco ambiental relevante no contexto da bacia estudada, estando próximas dos valores naturais esperados para solos derivados de rochas basálticas e areníticas, típicas da região (Marques et al., 2004, Cabral et al., 2024). A distribuição relativamente homogênea de Ni e Zn indica



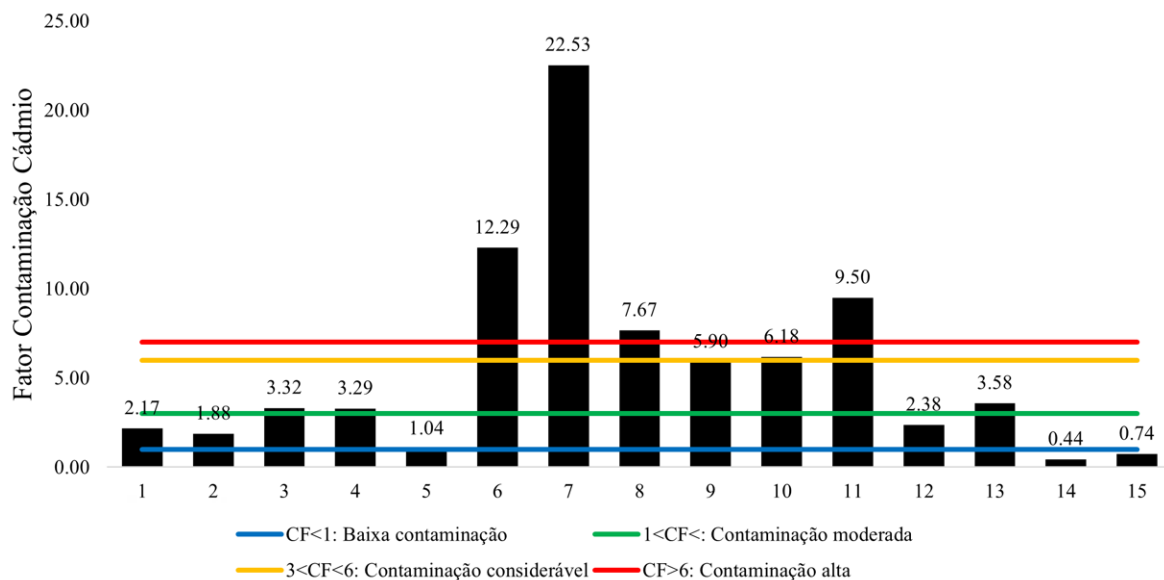
ausência de fontes pontuais ou enriquecimento significativo, reforçando a hipótese de origem predominantemente geogênica.

Esses resultados, em especial a severa contaminação por Cd, apontam para a necessidade de atenção e monitoramento contínuo da qualidade do solo em áreas de uso agrícola no Cerrado. A detecção de Igeo elevado para Cd destaca o risco potencial à saúde ambiental e humana, já que este elemento é reconhecido por sua toxicidade crônica e capacidade de bioacumulação. A compreensão da distribuição espacial desses elementos é fundamental para subsidiar estratégias de manejo e mitigação em áreas susceptíveis à contaminação por EPTs.

Com base nos valores de concentração obtidos e no cálculo do Fator de Contaminação (FC), os resultados para os elementos Cd, Ni e Zn indicam distintos níveis de impacto ambiental.

O Cd (Cádmio) apresentou um fator de contaminação (Figura 4) médio de 11,06, valor classificado como muito alto ($FC > 6$), conforme a classificação proposta por Hakanson (1980). Isso indica contaminação significativa por fontes antrópicas em todos os pontos amostrados, corroborando com estudos que demonstram a elevação dos teores de Cd em solos sob influência de atividades humanas, como uso de fertilizantes fosfatados, resíduos industriais e práticas agrícolas intensivas (Quevedo & Menezes, 2014; Castro-González et al., 2019).

FIGURA 4: Classificação qualitativa do cádmio segundo o fator de contaminação.



ORG.: Próprios autores (2025).



O Ni (Níquel) apresentou um FC médio de 0,82, enquadrando-se na categoria de baixo potencial de contaminação ($FC < 1$). Esses valores sugerem que, na área de estudo, as concentrações de Ni são compatíveis com os teores naturais do solo, provavelmente derivados da litologia local (Marques et al., 2004; Guilherme et al., 2005).

O Zn (Zinco) apresentou um FC médio de 0,32, o que também corresponde à categoria de baixo potencial de contaminação. As baixas concentrações de Zn sugerem ausência de fontes de poluição significativas, o que é compatível com solos de origem basáltica ou arenítica pouco influenciados por atividades antrópicas.

Portanto, o elemento Cd representa o maior risco ambiental entre os três metais analisados, indicando contaminação expressiva por fontes antrópicas. As áreas agrícolas foram as que apresentaram os maiores índices de FC, o que reforça a influência direta das práticas de uso e manejo do solo nesse tipo de contaminação, conforme também verificado por Akram Jamal et al. (2018) no Irã e He et al. (2020) na China.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos para os elementos Cd, Ni e Zn, e utilizando exclusivamente os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009, bem como os índices do Igeo (índice de geoacumulação) e FC (fator de contaminação), conclui-se que os solos da área de estudo apresentam distintos níveis de contaminação ambiental, com ênfase no elemento cádmio (Cd).

O Cd apresentou concentrações superiores ao Valor de Investigação ($VI = 3,0 \text{ mg kg}^{-1}$) em seis dos quinze pontos de amostragem (6, 7, 8, 9, 10 e 11), com destaque para o ponto 7, que alcançou $13,52 \text{ mg kg}^{-1}$, valor mais de quatro vezes superior ao VI. O índice de geoacumulação (Igeo) para o Cd variou entre 3,52 e 6,42, com média geral de $5,21 \pm 1,31$, classificando os solos como fortemente a extremamente contaminados ($Igeo > 4$), conforme a escala de Müller (1969).

O fator de contaminação (FC) para o Cd apresentou valores médios superiores a 6 na maioria desses pontos, o que indica nível de contaminação muito alto segundo a classificação de Hakanson (1980). Esses resultados apontam uma forte influência antrópica, atribuída principalmente ao uso intensivo de fertilizantes fosfatados, corretivos de solo e outros insumos agrícolas, reconhecidamente fontes difusas de Cd em áreas produtivas.

Para o níquel (Ni) e o zinco (Zn), as concentrações permaneceram abaixo dos respectivos Valores de Prevenção (VP) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (30 mg kg^{-1} para Ni e 300 mg kg^{-1} para Zn), e nenhum ponto excedeu os Valores de Investigação (VI). Os valores de Igeo para esses elementos variaram entre $\leq 0,5$, sendo classificados como não contaminados a moderadamente contaminados, enquanto os



FCs obtidos para ambos ficaram consistentemente abaixo de 1, caracterizando baixo grau de contaminação. Essa condição sugere uma possível origem natural (geogênica) para Ni e Zn, relacionada às características litológicas e pedológicas da região, composta predominantemente por rochas basálticas e areníticas.

De forma geral, os dados indicam que o Cd é o elemento de maior preocupação ambiental, com potencial risco ecotoxicológico e necessidade urgente de medidas de gestão e controle. As áreas com maior acúmulo de Cd coincidem com regiões de uso agropecuário intensivo, reforçando a importância da adoção de práticas agrícolas sustentáveis, bem como da implementação de programas de monitoramento ambiental contínuo. A inexistência de Valores de Referência de Qualidade (VRQs) específicos para o estado de Goiás ainda constitui um entrave à atuação eficaz dos órgãos ambientais estaduais. Portanto, recomenda-se o fortalecimento das políticas públicas ambientais e o desenvolvimento de estudos regionais que subsidiem critérios técnico-normativos para a prevenção, remediação e gestão de áreas contaminadas por elementos potencialmente tóxicos.

Agradecimentos:

A FAPEG (Processo nº202310267000519) e CNPq (Processo nº 101978/2022-7) pelo financiamento da pesquisa.



REFERÊNCIAS

- AHMED, S. F., et al. Heavy metal toxicity, sources, and remediation techniques for contaminated water and soil. **Environmental Technology & Innovation**, 25, 102114, 2022.
- ALLOWAY, B.J. **Sources of heavy metals and metalloids in soils**. In: ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. Springer, Dordrecht. p. 11-50, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-94-007->
- ANNAMMALA, K. V., et al. Sediment clues in flood mitigation: the key to determining the origin, transport, and degree of heavy metal contamination. **Hydrology Research**, 52(1), 91-106, 2021.
- BARBALHO, M., SILVA, A., & CASTRO, S. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região sul do estado de Goiás de 2001 a 2011. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**,(29), 98-110, 2013.
- BATISTA, D. F., & CABRAL, J. B. P. Avaliação qualitativa dos níveis de contaminação por elementos potencialmente tóxicos na bacia do ribeirão santo antônio em Iporá-GO. **Geoambiente On-line**, (45), 2023.
- BRITO, A. C. C. et al. Assessing the Distribution and Concentration of Heavy Metals in Soils of an Agricultural Frontier in the Brazilian Cerrado. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 8, p. 388, 18 ago. 2020.
- CABRAL J. B. P., et al. Harmful Effects of Potentially Toxic Elements in Soils of Cerrado Biomes. **Water Air Soil Pollut** 234:334, 2023a. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06344-2>
- CABRAL J. B. P, et al. Environmental assessment and toxic metal-contamination level in surface sediment of a water reservoir in the Brazilian Cerrado. **Water (Switzerland)** 13, 2021.
- CABRAL J. B. P., et al. Environmental contamination levels based on geochemical properties of soils from direct influence areas of hydroelectric power plants. **Arabian Journal of Geosciences** 16:327, 2023c. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11419-9>
- CABRAL, J. B., et al. Harmful Effects of Potentially Toxic Elements in Soils of Cerrado Biomes. **Water, Air, & Soil Pollution**, 234(6), 334, 2023.
- CASTRO-GONZÁLEZ, N. P, et al. Health risks in rural populations due to heavy metals found in agricultural soils irrigated with wastewater in the Alto Balsas sub-basin in Tlaxcala and Puebla, Mexico. **Int J Environ Health Res** 27(6):476-486, 2017. <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1386767>
- CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **DECISÃO DE DIRETORIA Nº 195-2005- E**, de 23 de novembro de 2005. Disponível em:< <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2022/09/DD-195-05-E-Aprovacao-dos-val.Orientadores-para-solos-e-aguas-subt.no-Estado-de-Sao-Paulo.pdf>>. Acesso 05 de Jun. de 2025.
- COLMAN, C. B, Guerra A, Almagro A, et al (2024) Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the need to account for private property sizes for biodiversity conservation. **Sci Rep** 14:4559. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55207-1>
- COLZATO M, ALLEONI L. R. F, KAMOGAWA M. Y. Cadmium sorption and extractability in tropical soils with variable charge. **Environ Monit Assess** 190(6):345, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6666-7>
- CONAMA-Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Brasília, 2009.
- COPAM. **RESOLUÇÃO COPAM No 166**, de 29 de junho de 2011. 2011
- CORREA, M., et al. **Valores de referência para metais pesados em solos de uma bacia na zona costeira do nordeste do Brasil**: reference values for heavy metals in soils of a basin in the coastal zone of northeast Brazil. **IX Sustentável**, 10(5), 17–35, 2024.
- DUARTE, T. E. P. N.; LEITE, L. B. Cidades médias no Cerrado Brasileiro: desafios para a conservação da biodiversidade. **Terr@ Plural**, Ponta Grossa, v. 14, p. 1-7, dez, 2020.
- ELBEHIRY F, et al. Available concentrations of some potentially toxic and emerging contaminants in different soil orders in Egypt and assessment of soil pollution. **J Soils Sediments** 21:3645–3662, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03021-x>
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. Embrapa-CNPS. 1-212, 1997.
- FAO, UNEP. **Global assessment of soil pollution**: Report. FAO and UNEP, Rome, Italy, 2021.
- FEPAM. **Portaria FEPAM Nº85/2014**. Disponível em:< <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=274628#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20estabelecimento%20de,do%20Rio%20Grande%20do%20Sul.>>. Acesso 05 de Jun. de 2025.
- FILIZOLA H. F, GOMES M. A. F, SOUZA M. D. **Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental**: Solo, Água e Sedimentos. In Embrapa, 2006. URL: <https://>



- www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/15292/manual-de-procedimentos-de-coleta-de-mostras-em-areas-agricolas-para-analise-da-qualidade-ambiental-solo-agua-e-sedimentos
- FRANÇOSO R. D. et al. Delimiting floristic biogeographic districts in the Cerrado and assessing their conservation status. **Biodivers Conserv** 29:1477–1500, 2020.
- FU C, et al. Heavy metal(loid)s contamination assessment of soils in Shendong coal base of the Kuye River basin, China: spatial distribution, source identification and ecological risk. **Environ Earth Sci** 82, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11156-y>
- GUERRA M. B. B., et al. Increased mobilization of geogenic arsenic by anthropogenic activities: The Brazilian experience in mining and agricultural areas. **Curr Opin Environ Sci Health** 33, 2023.
- HAKASON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. **Water Research**, v. 14, n. 8, p. 975–1001, jan. 1980.
- HE L, et al. Analysis of heavy metal contamination of agricultural soils and related effect on population health—a case study for East River Basin in China. **Int J Environ Res Public Health** 17(6):1996, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061996>
- Hunke, P., et al. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Geoderma Regional**, 4, 31–43, 2015.
- KABATA-PENDIAS A., MUKHERJEE A. B. Trace elements from soil to human. Springer, **Berlin Heidelberg**, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
- KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants** (4th ed.). CRC Press, 2010.
- LEHMANN J, et al. The concept and future prospects of soil health. **Nat Rev Earth Environ** 1:544–553, 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- LEWIS K, et al. Mapping native and non-native vegetation in the Brazilian Cerrado using freely available satellite products. **Sci Rep** 12:1588, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05332-6>
- LONGO, R. M.; et al. Atributos químicos e metais pesados em solos de remanescentes florestais urbanos. **Revista Cerrados**, v. 18, n. 02, p. 183-207, 21 set. 2020.
- LOSKA, K.; WIECHUŁA, D.; KORUS, I. Metal contamination of farming soils affected by industry. **Environment International**, 30(2), p. 159–165, 2004.
- MACIEL, E. A., et al. Defaunation and changes in climate and fire frequency have synergistic effects on aboveground biomass loss in Brazilian savanna. **Ecological Modelling** v. 454, ago, 2023.
- MACIEL, L. G. **Efetividade e eficácia das reservas legais e áreas de preservação permanente nos cerrados**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- Marques JJ, Schulze DG, Curi N, Mertzman SA (2004) Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma** 119(3–4):179–195. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00260-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00260-X)
- MCCAULEY, A.; JONES, C.; JACOBSEN, J. Soil pH and Organic Matter. Montana State University Extension, 2009
- MULLER, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine Riv. **Geo Journal**, v. 2, p. 108–118, 1969.
- PATINHA, C., et al. Inorganic pollutants in soils. In *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation* (pp. 127–159). **Elsevier**, 2017.
- PAYE H de S, et al. Reference quality values for heavy metals in soils from Espírito Santo State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo** 34(6):2041–2051, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600028>
- EREIRA R. G., MARTINS A. P. Fragilidade ambiental potencial e emergente na bacia hidrográfica do Rio Bonito-GO – Brasil. **Geoambiente On Line** 42:1, 2022.
- Preston W, et al. Soil contamination by heavy metals in vineyard of a semiarid region: an approach using multivariate analysis. **Geoderma Regional** 7(4):357–365, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.11.002>
- RAIJ B. V, et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Instituto Agronômico/Fundação IAC, Campinas, 1997.



- RAMESH T, et al. Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. pp 1–107, 2019.
- RASHID A, et al. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy* 13, 2023.
- REIS M. M, et al. Heavy metals in soils and forage grasses irrigated with Vieira River water, Montes Claros, Brazil, contaminated with sewage wastewater. **Ambiente e Agua - an Interdisciplinary J Appl Sci** 15(2):1, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2440>
- ROCHA, H. M., et al. Distribution of radionuclides in soils of drainage basin/cerrado biome and their relationship with the land occupation and use model. *Applied Geochemistry*, 179, 106253, 2025.
- SANCHEZ, P. A. Properties and Management of Soils in the Tropics. **Cambridge University Press**, 2019.
- SANTOS, H. G. dos; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SANTOS, M. B.; FARIA, K. M. S. Vulnerabilidades ambientais do Bioma Cerrado: Estudo da região Norte Goiano-Goiás. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 14, n. 34, p. 242-258, jan./abr, 2020.
- SANTOS, S.N. **Valores de referência de metais pesados em solos de Mato Grosso e Rondônia**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2011.
- SILVA J.M.C, LACHERT E. **Cerrado—South America**. In: Encyclopedia of the World's Biomes. Elsevier, pp 546–553, 2020.
- SILVA, S. S, et al. Soil bacterial communities in the Brazilian Cerrado: Response to vegetation type and management. **Acta Oecologica**, 100, 2019.
- SIQUEIRA-NETO M, et al. Impacts of land use and cropland management on soil organic matter and greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Eur J Soil Sci** 72:1431–1446, 2021. <https://doi.org/10.1111/ejss.13059>
- SOARES, F. R., OLIVEIRA, R. G., & SOBRINHO, H. M. R. O impacto dos metais pesados na patogênese e progressão da doença de Alzheimer. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, 15(2), e9454-e9454, 2022.
- SOJKA, M., & JASKUŁA, J. Heavy metals in river sediments: contamination, toxicity, and source identification—a case study from Poland. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 19(17), 10502, 2022.
- SOJKA, M., et al. Ecological and health risk assessments of heavy metals contained in sediments of Polish dam reservoirs. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 20(1), 324, 2022.
- SONG X.P, et al. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. **Nat Sustain** 4:784–792, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z>
- STRASSBURG B. B. N, et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nat Ecol Evol** 1:0099, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- TOMLINSON, D. L. et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. **Helgoländer Meeresuntersuchungen**, v. 33, n. 1–4, p. 566–575, mar. 1980.
- VAN RAIJ, B., et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Instituto Agronômico, Campinas, p 285, 2011.
- VINHAL-FREITAS I. C, et al. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecol Indic** 74:182–190, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>
- VINHAL-FREITAS, I., et al. Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Lang muir. **Agropecuária Técnica**, 31, 155–163, 2010. <https://doi.org/10.25066/a>
- WU, Y., et al. Review of soil heavy metal pollution in China: Spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives. *Resources*, **Conservation and Recycling**, 181, 106261, 2022.
- ZHANG, Q., & WANG, C. Natural and human factors affect the distribution of soil heavy metal pollution: a review. **Water, air, & soil pollution**, 231, 1-13, 2020.



ESTUDO DA RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM NA SERRA DA MERUOCA, NOROESTE DO ESTADO DO CEARÁ

José Marcos Duarte Rodrigues ¹

Simone Ferreira Diniz ²

PALAVRAS-CHAVE: Componentes físico-ambientais, Unidades e subunidades de paisagens, solo-paisagem.

RESUMO

O presente trabalho visa realizar um estudo das relações solo-paisagem na Serra da Meruoca. Tais estudos são importantes na caracterização das paisagens. Portanto, a presente pesquisa analisou e caracterizou as unidades de paisagens na Serra da Meruoca, situada na região noroeste do estado do Ceará, Nordeste do Brasil. A Serra da Meruoca, de acordo com Lima, Claudino-Sales e Oliveira (2021), corresponde a um maciço cristalino, delimitado por falhas geológicas. Para compreender a relação solo-paisagem, utilizou-se dados temáticos referentes aos componentes físico-ambientais. Também se realizou a compartimentação das unidades e subunidades de paisagens, que segundo Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2013), delimitar unidades de paisagens consiste em determinar, de acordo com seus traços, os objetos semelhantes ou análogos. Desta forma, utilizou-se ferramentas dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para analisar como os solos relacionam-se com os demais componentes das paisagens. Desta forma, percebeu-se que as classes de solos variam conforme as mudanças dos aspectos físicos-ambientais que compõem as paisagens, principalmente as condições climáticas e geomorfológicas.

¹ Pós-doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Vale do Acaraú – PROPGEO/UEVA, marcos_duarte@uvanet.br

² Professora do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Vale do Acaraú – PROPGEO/UEVA, simone_diniz@uvanet.br



INTRODUÇÃO

O estudo da relação solo-paisagem, de acordo com Campos (2012), inicia com Dockuchaev, no início do século XIX. No entanto, foi somente com o conceito de Catena, proposto por Milne (1936), que se compreendeu as mudanças na paisagem como fator alterador dos arranjos e distribuição dos solos.

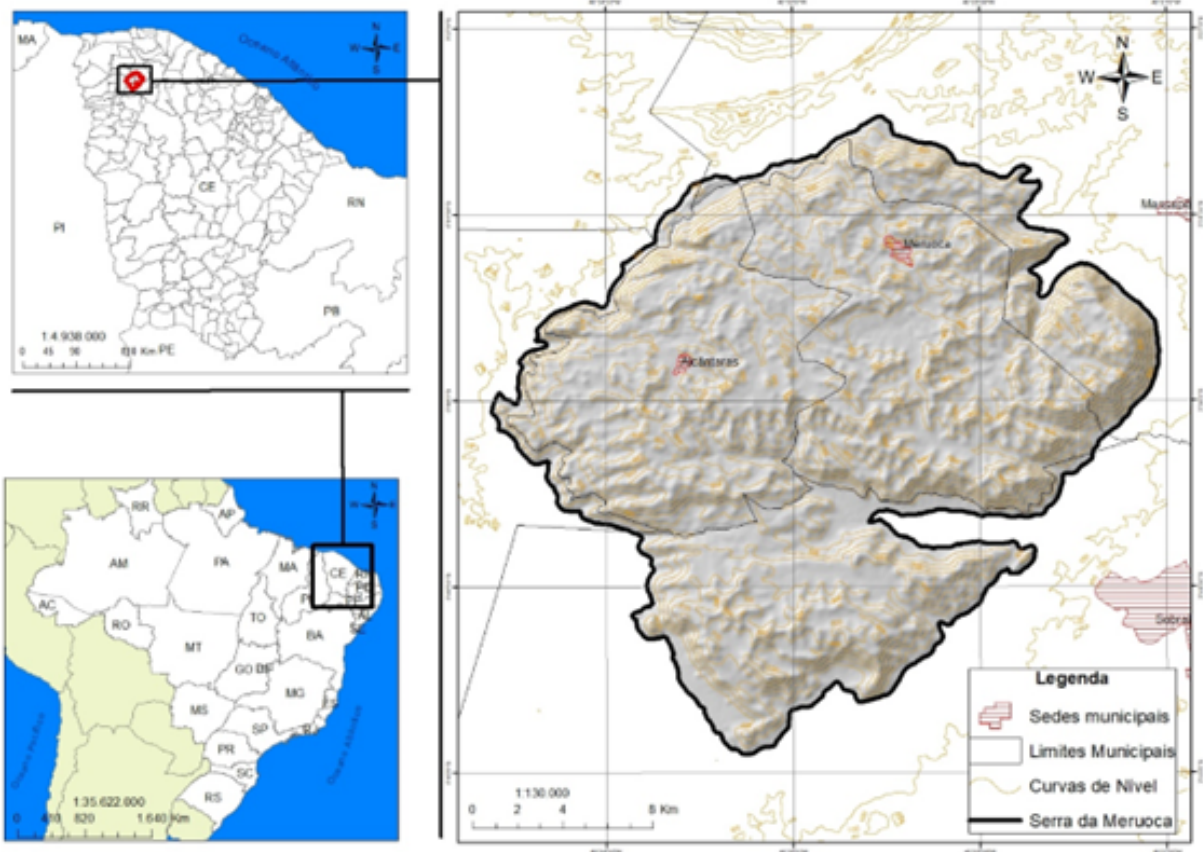
No Brasil, tais estudos iniciaram na década de 1960, se intensificando na década de 1970, por meio de autores como Klamt e Beatty (1972), Lepsch et al. (1977), Campos (2012), dentre outros. Para Pereira (2020), os estudos das relações solo-paisagem voltam-se para o planejamento e preservação ambiental, por possibilitarem identificar as melhores condições de uso, estabelecendo parâmetro para a sustentabilidade.

Segundo Pereira (2020), os estudos da relação solos-paisagem estão voltados para o entendimento da caracterização da paisagem e como subsídio aos estudos de sustentabilidade e ao planejamento de uso da terra. Com relação ao primeiro, o autor destaca que nos estudos da paisagem deve-se observar todos os seus componentes, pois qualquer mudança na superfície altera a dinâmica superficial e subsuperficial, alterando a estrutura dos solos, portanto interfere na paisagem em sua totalidade. Já a aplicação da relação solo-paisagem, voltada para planejamento e preservação ambiental, permite identificar as melhores condições de uso, além de possibilitar a definição de parâmetros para a sustentabilidade.

Assim, no presente trabalho, analisou-se a relação solo-paisagem na Serra da Meruoca, localizada entre as coordenadas geográficas 3° 32' 30" Latitude (s) e 40° 27' 18" Longitude (WGr) (MENDES et al., 2021). De acordo com Lima, Claudino-Sales e Oliveira (2021) e Rodrigues et al. (2024), a mesma corresponde a um maciço cristalino, delimitado por falhas geológicas, se aproximando da forma de um losango e apresenta condições climáticas com maior umidade, diferenciando-se da condição de semiaridez característica da região na qual está inserida.



FIGURA 1: Localização da Serra da Meruoca.



FONTE: Rodrigues et al. (2024).

É importante mencionar que, atualmente, a Serra da Meruoca corresponde a uma Área de Preservação Ambiental–APP, criada conforme a Lei n.º 11.891, de 24 de dezembro de 2008, abrangendo uma área de 29.361,27 hectares. A Área de Proteção Ambiental Serra da Meruoca apresenta a seguinte delimitação: as vertentes nordeste, leste e sudeste, a partir da cota de 200 m (duzentos metros) de altitude, nos Municípios de Meruoca e Massapê e toda a área compreendida acima da cota de 600 m de altitude, nos Municípios de Meruoca, Massapê, Alcântara e Sobral (LIMA; FREITAS FILHO, 2015).

A mesma consiste em um maciço residual úmido, com altitudes ultrapassando os 900 m, com topos côncavo-convexos e vertentes íngremes. Devido à sua significativa altitude e localização geográfica, apresenta-se com maior umidade e maiores índices pluviométricos, em relação às áreas e seu entorno. Portanto, estudos que objetivem analisar a relação solo-paisagem, muito contribuem para a preservação e conservação das paisagens que integram a Serra da Meruoca.

MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa visa analisar a relação solo-paisagem na Serra da Meruoca. Portanto, o primeiro passo foi delimitar as unidades de paisagens. Para



isso, inicialmente, foi necessário identificar e caracterizar os componentes físico-ambientais. Portanto, utilizaram-se dados secundários presentes em artigos, dissertação e dados produzidos por órgãos públicos, onde se coletaram dados no formato Shapefile, referentes à pedologia, geologia, clima, etc. Assim, como dados raster, referentes à altitude e declividade. Todos os dados foram plotados e manipulados em ambiente SIG, onde se recolocaram os mesmos para a área da pesquisa e realizou-se a sobreposição dos mesmos.

A partir de então, realizou-se a delimitação das unidades e subunidades de paisagens, utilizando como critério principal as feições do relevo, considerando a estrutura geológica, as condições climáticas, a pedologia, vegetação e uso e cobertura da terra. Nessa etapa, foram efetuados os trabalhos de campo, nos quais foram realizadas observações sobre as características paisagísticas, principalmente com relação aos tipos de solos.

Após, em ambiente SIG, realizou-se a sobreposição dos dados, a qual permitiu identificar a distribuição dos solos em relação aos demais componentes. Desta maneira, analisou-se a paisagem partindo de suas características conforme os diferentes tipos de solos, referentes a cada unidade de paisagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos componentes físico-ambientais na Serra da Meruoca

Consoante a classificação proposta por Diniz (2010), a Serra da Meruoca situa-se na unidade fisiográfica planalto baixo. Segundo a autora, essa unidade abrange desde a descida da Ibiapaba até os tabuleiros costeiros. Sendo constituída por rochas sedimentares e cristalinas (ígneas e metamórficas), com evidências de intrusões pegmatíticas.

Do ponto de vista geológico a Serra da Meruoca compreende a um “Stock” granítico, grosseiramente avermelhado, gerado na orogênese brasileira, correspondendo a eventos de colisão continental que formaram o supercontinente Gondwana, durante o Proterozoico (2,5–541 Ma) (BRITO NEVES, 1999; LIMA; CLAUDINO-SALES; OLIVEIRA, 2021). No Cretáceo (145 – 65 Ma), houve o soerguimento dos granitos na forma de ombro de riftes, durante a separação dos continentes americano e africano (PEULVAST; CLAUDINO-SALES, 2004). O maciço Meruoca foi soerguido durante este evento e, durante todo o Cenozoico, vem sendo esculpado por processos erosivos, sendo assim um resíduo dos ombros de riftes (CLAUDINO-SALES, 2016).

Quanto a geomorfologia, compreende a um maciço residual, estruturado sobre o Granitoide Meruoca (eg4m), delimitado por Zonas de Cisalhamento (ZC) brasileira, com vertentes tipicamente derivadas de falhas (Lima; Claudino-Sales; Oliveira, 2021),



encostas com declives e aclives bem acentuados e vales profundos (LIMA, 2014; FERREIRA; RODRIGUES; LIMA, 2023). De acordo com Dantas et al. (2014), maciços residuais, no caso da Meruoca, apresentam topos ou cimeira de relevo em colinas, indicando a pré-existência de antigas superficiais planálticas mais vastas que as atuais, constituindo brejos de altitudes, apresentando vertentes íngremes e topos dissecados em colinas.

Nas palavras de Sousa (2024) e IPECE (2017), toda a Serra da Meruoca está enquadrada no clima Tropical Quente Semiárido Brando e Tropical Quente Subúmido, com totais pluviométricos anuais superando os 1.000 mm e temperaturas variando de 24 °C a 26 °C. Lima (2014), considera que o clima da Serra da Meruoca, na classificação de Köppen, corresponde ao Aw', com chuvas de verão e precipitações máximas no outono, caracterizando-se como quente e úmido, com precipitações distribuídas entre janeiro e junho.

Quanto à pedologia, identificaram-se duas classes do primeiro nível categórico (ordem) de solos predominantes, os Argissolos (P) e os Neossolos (R). Os Argissolos (P), segundo Santos et al. (2025, p. 97), corresponde a um grupamento de solos “[...] constituídos de material mineral com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico e horizonte B textural imediatamente abaixo de horizonte A ou E”.

Já os Neossolos (R), corresponde ao grupamento de solos pouco evoluídos, sem horizonte B diagnóstico definido. Ou seja, “solos constituídos de material mineral ou material orgânico pouco espesso que não apresenta alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos” (SANTOS et al., 2025, p. 105).

Com relação à vegetação, segundo a classificação de Fernandes (1990), ocorre a Mata Úmida (Perenifólia), nas áreas acima dos 650 m de altitude e nas vertentes a barlavento, podendo ocorrer também áreas de Mata Seca (Subcaducifólia). Já nas vertentes secas, identifica-se a Caatinga Arbustiva-Subarbustiva (Caducifólia), ou seja, vegetação tipicamente semiárida.

Com relação aos usos, percebeu-se atividade relacionada à pecuária, principalmente criação de bovinos. Também se identificou culturas temporárias e permanentes, como o milho, feijão, plantação de banana, dentre outros. Quanto à ocupação, as cidades de Meruoca e Alcântara, e alguns distritos como Jordão, Anil, Palestina do Norte, São Francisco e Ventura, se destacam. Tal fato demonstra que a Serra da Meruoca é expressivamente ocupada.

Assim, segundo Moreira e Gato (1981) e Costa Falcão e Silva (2002), a Serra da Meruoca apresenta uma combinação ambiental distinta da semiaridez, relacionada

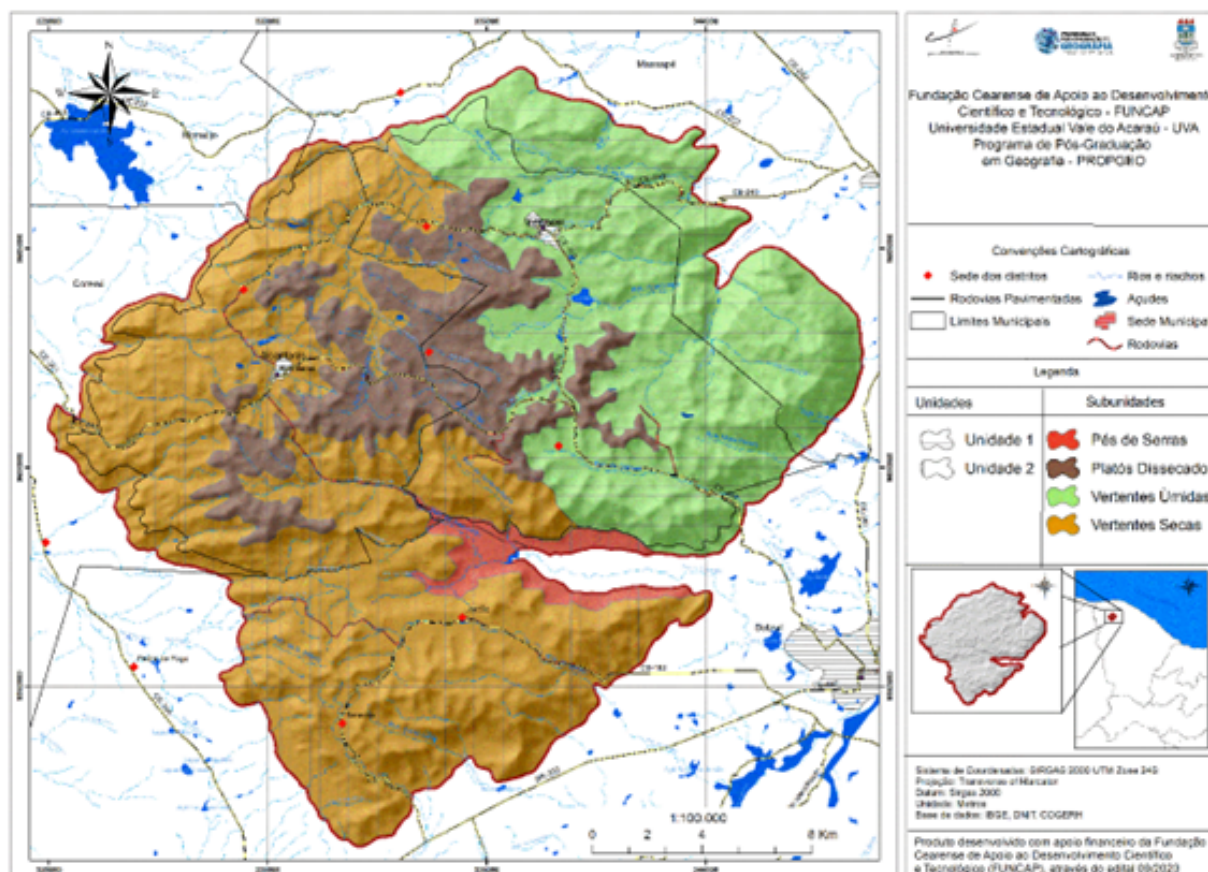


ao clima devido à situação orográfica, solos com significativa fertilidade, mas com alto nível de desmatamento. No entanto, apesar dos expressivos níveis de degradação ambiental, a área ainda apresenta remanescentes de florestas úmidas. Desta forma, a área em estudo apresenta paisagens diversificadas.

Solos e paisagem na Serra da Meruoca

Devido às condições climáticas, principalmente a pluviometria e a temperatura, identifica-se duas unidades de paisagens bem distintas, uma mais úmida e outra mais seca. Com relação às subunidades de paisagens, identificaram-se os platôs dissecados, as vertentes secas, as vertentes úmidas e pequena área caracterizada como pés de serra, referente a pedimentos (Figura 2).

FIGURA 2: Unidades e subunidade de paisagens na Serra da Meruoca



FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

A unidade de paisagem 1, situada nas porções norte e nordeste, com vales profundos e topos superando os 900 m, apresenta maior umidade e pluviometria e temperaturas mais amenas. É constituída por cristas, colinas e formas semi-mamelonizada, conforme salientado por Moreira e Gato (1981). Desta maneira, segundo Lima (2016), a primeira unidade de paisagem está sob atuação mais intensa do intemperismo químico, favorecendo a formação de solos mais profundos e uma cobertura vegetal de maior porte.



A unidade 2, situada ao sul e oeste, em cotas altimétricas entre 600 m e 800 m, apresenta condição de semiaridez, com menor umidade, menor pluviometria e maiores temperaturas, como afirma Lima (2014). Ou seja, situa-se a sota-vento, as condições climáticas caracterizam-se por má distribuição das chuvas, altas temperaturas e baixa umidade. Tal fato tem influência na predominância do intemperismo físico, inibindo a atuação da pedogênese. Desta forma, nesses setores ocorre com predominância os Neossolos, principalmente os Neossolos Litólicos e Quartzarênicos (RODRIGUES et al., 2024).

Com relação às subunidades de paisagens, conforme os trabalhos de Rodrigues et al. (2024), indentificou-se para a Serra da Meruoca, quatro subunidades: os platôs dissecados, as vertentes secas, as vertentes úmidas e pequena área caracterizada como pés de serra, referente a pedimentos.

Os pés de serras possuem somente 13 km², representando 2,8% da área pesquisada. Devido ao fato das condições climáticas de maiores temperaturas, menor umidade e menores índices pluviométricos, os solos caracterizam-se por serem rasos, pouco profundos, rochosos e pedregosos. Desta maneira, predominam os Neossolos Litólicos (RL). Ou seja, “Solos com contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm da sua superfície” (SANTOS et al., 2018, p. 227). O horizonte A ou hístico situa-se diretamente sobre a rocha, ou sobre uma camada, ou horizonte Cr, ou C, admite-se a existência de um horizonte B, mas ainda em formação.

Consoante a FUNCEME (2024), esses solos apresentam expressiva variação de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos, devido à diversidade do material de origem. Na área pesquisada, tais solos são originários tanto de rochas graníticas, Granito Meruoca, como de rochas metamórficas da formação Pacujá, Covão, dentre outras. Quanto às potencialidades e limitações, são solos que apresentam restrição ao uso agrícola, devido à sua pouca profundidade, com pedregosidade e bastante rochosidade.

Nesta subunidade de paisagem, em alguns trabalhos como Lima (2016) e Mendes (2020), assim como em trabalhos de campo, foi possível perceber a existência de Luvisolos Crômicos. Ou seja, solos pouco ou moderadamente intemperizados, constituídos por material mineral, com horizonte B textural, apresentando argila de alta atividade e saturação por base na maior parte do primeiro 100 cm do horizonte B (SANTOS et al., 2018).

Nas palavras da FUNCEME (2024), morfologicamente destacam-se pela coloração vermelha ou avermelhada no horizonte Bt, constituem-se fisicamente de textura média



na superfície e argilosa na subsuperfície. Quimicamente, são solos bastante férteis. Desta forma, possuem potencialidades para uso agrícola, mas limitações devido à sua espessura e restrições hídricas.

Sobres esses solos desenvolveu-se a caatinga arbustiva-subarbustiva densa e aberta (caducifolia), em relevo ingrime, mas em baixas altitudes, não superando os 400 m. Quanto ao uso, ocorrem atividades voltadas para a agropecuária, predominando a criação de bovinos e plantios de lavouras temporárias, como milho e feijão. Devido ao uso intenso dos solos e da vegetação, encontram-se bastante alterados, portanto, necessitam de medidas conservacionistas.

As vertentes úmidas possuem 154 km², correspondendo a 32,2% da área total. Apresentam condições climáticas de maior umidade e precipitação, e temperaturas mais amenas, associando-se à presença de solos mais profundos recobertos pela mata úmida. Quanto aos usos, as culturas permanentes são mais presentes, como o plantio de banana, manga, dentre outros. Por seu turno, os maiores índices de pluviometria e umidade associam-se com a presença de solos mais profundos e mais bem desenvolvidos, como os Argissolos, principalmente os Argissolos Vermelho-Amarelos.

Para Mendes et al. (2021), os Argissolos Vermelho-Amarelos apresentam boas condições para produção agrícola, estando sobre a atuação de culturas de subsistência, como milho, feijão e cultivo de banana. No entanto, por estarem situados em relevo acidentado e apresentarem diferença textural entre os horizontes, possuem mais suscetibilidade à erosão, apresentando restrições para os usos (LIMA, 2014).

De acordo com Diniz (2010), estes solos apresentam fertilidade variando de média a alta. Mendes et al. (2021) analisaram um perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo com a presença de vegetação e outro perfil sem a presença da vegetação, onde concluiu que os mesmos possuem um bom desempenho agrícola, mas que devem ser conservados, ao serem utilizados para o cultivo do milho, feijão e banana. Segundo Bastos (2012), o principal fator limitante de uso dos Argissolos Vermelho Amarelo é a topografia, pois os mesmos situam-se em áreas dissecadas e sua expressiva diferença textural entre os horizontes pode facilitar o deslizamento no caso de saturação hídrica.

Vale destacar que nessa subunidade de paisagem, em alguns setores das vertentes úmidas, devido à maior declividade, os processos erosivos são melhor evidenciados, inibindo a atuação da pedogênese, ocasionando afloramento de rochas escarpadas.

As vertentes secas representam 50,4% da área em estudo, correspondendo a um total de 241 km². Apresentam as condições climáticas de semiaridez típica, possibilitando a atuação mais intensa do intemperismo físico, estando associada com a predominância



de solos rasos e jovens, como os Neossolos Litólicos, recoberto pela caatinga arbórea (mata seca) ou arbustiva (caatinga). Nas áreas mais elevadas (acima de 500 m) ocorrem os Argissolos Vermelho-Amarelos, recobertos pela Caatinga Arbustiva-Arbórea.

De acordo com Ferreira, Lima e Rodrigues (2023), nas vertentes secas encontram-se de forma mais expressiva os afloramentos de rochas, devido ao fato da morfogênese superar a pedogênese, apresentando feições graníticas, como lajedos, Boulders, dentre outras. Com relação ao uso dos solos, identifica-se a prática da agricultura de subsistência, principalmente milho e feijão. Mas também percebeu-se a prática pecuária extensiva, com criação de bovinos, caprinos e ovinos. Portanto, ocorre o desmatamento acelerando os processos erosivos (LIMA, 2016).

Os platôs dissecados, na área em estudo, possuem 70 km², representando 14,5%. Os mesmos apresentam característica semelhante às das vertentes úmidas, constituindo-se como brejo de cimeira, com relevo em colinas, cristas e lombas, intercaladas por alvéolos (LIMA, 2016). Apresentam condições climáticas tanto semelhantes às vertentes úmidas como às vertentes secas. Nessa área, inclui os alvéolos, os quais são mais densamente ocupados. Predominam os Argissolos Vermelho-Amarelos, mas também ocorrem os Neossolos Flúvicos nas áreas de alvéolos, com o predomínio da mata úmida.

Nas áreas de maior elevação onde ocorrem os Argissolos Vermelho-Amarelos, segundo Falcão Sobrinho (2006), esses solos possuem mais de um (1) metro de espessura, recobertos por vegetação de porte arbóreo, referindo-se à mata úmida e à mata seca.

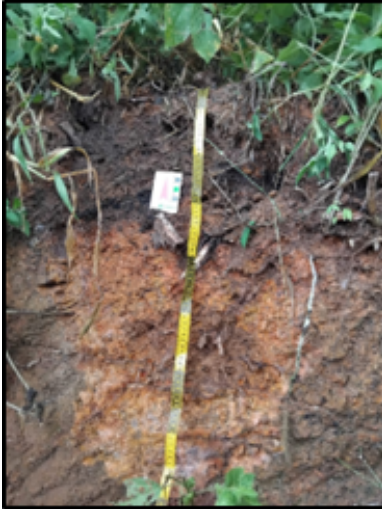
De acordo com Diniz (2010, p. 42), nos alvéolos os solos são “geralmente profundos a muito profundos, com horizonte A fraco e sequência de horizontes A-C, excessivamente drenados, fortemente ácidos, com baixos teores de argilas (menos de 15%), coloração variando de vermelha a branca, ou mesmo amarelada.” Portanto, apresentam limitações para uso agrícola, sendo bastante utilizados para agricultura de subsistência. Para Lima (2016), esses solos possuem boa fertilidade natural, com potencial para atividade agrícola. Na área pesquisada, notou-se o cultivo de caju e cultivos temporários como milho e feijão.

Na figura 2, mostra-se um Luvissole Crômico, situado nas vertentes secas, recoberto pela Caatinga Arbustiva Arbórea (mata seca), com construção de residências próximas ao local. A figura 3 representa um Neossolo Litólico, situado nos pés de serras, recoberto pela Caatinga Arbustiva-Subarbustiva Aberta, com sinais evidentes de degradação. Na figura 5, tem-se um Argissolo Vermelho-Amarelo, situado nas vertentes úmidas, recoberto pela mata úmida, sem sinais intensos de usos.



FIGURAS 3, 4 E 5: Tipos de solos presentes nas paisagens da Serra da Meruoca.

01



02



03



FONTE: Acervo pessoal dos autores (2025)

Desta forma, percebeu-se que a distribuição dos solos na Serra da Meruoca está intimamente ligada às condições paisagísticas, principalmente à posição geomorfológica e às condições climáticas, influenciando na ocorrência dos tipos de vegetação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim, entende-se que cada unidade e subunidade de paisagem possuem características físico-ambientais próprias, o que possibilitou sua individualização. No entanto, cabe salientar que as mesmas estão em constante interação entre si, através dos fluxos de Energia, Matéria e Informação. Assim, encontram-se em diferentes estados ambientais, algumas mais preservadas, outras mais alteradas.

Percebe-se também que os solos se relacionam com as características das paisagens, principalmente com o material originário (geologia) e com as formas de relevo e as condições climáticas. Em um primeiro momento, em escala média a pequena, identifica duas unidades de paisagens bem distintas, com condições climáticas que influenciam diretamente a formação dos solos. Portanto, a unidade com condições climáticas mais úmidas apresenta solos mais profundos e melhor desenvolvidos, como os Argissolos, enquanto a segunda unidade, com clima mais seco, constitui-se de solos mais rasos e poucos profundos, como os Neossolos.

Quando as subunidades, percebe-se que os solos estão relacionados às formas de relevos. Nas áreas mais elevadas, nos topos e nas vertentes com melhores condições climáticas, os Argissolos Vermelhos-Amarelos predominam. Já nas vertentes secas e nos pés de serras, ocorrem Neossolos Litólicos e Luvisolos Crômicos.



Desta forma, no presente trabalho identificou-se que a distribuição dos solos na Serra da Meruoca está intimamente ligada às condições paisagísticas, principalmente à posição geomorfológica e às condições climáticas, influenciando na ocorrência dos tipos de vegetação e no processo de uso e ocupação da terra.

Agradecimentos:

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo financiamento concedido por meio do Edital 09/2023 e Processo FPD 0213001130100/23, ao Laboratório de Estudos Ambientais e Climáticos (LEAC) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia - PROP GEO/UVA – Universidade Estadual Vale do Acaraú - CE.

REFERÊNCIAS

- BASTOS, F. H. **Movimento de massa no Maciço de Baturite (CE) e contribuições para estratégia de planejamento ambiental.** 2012. 257f. Tese (Doutorado de Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós Graduação em Geografia, Fortaleza, 2012.
- BRITO NEVES, B. B. de. América do sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 379-392, 1 set. 1999. Sociedade Brasileira de Geologia. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.199929379392>
- CAMPOS, M. C. C. Relações solo-paisagem: conceitos, evolução e aplicações / soil-landscape relationships. **Revista Ambiência**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 963-982, 30 dez. 2012. GN1 Sistemas e Publicacoes Ltd.. <http://dx.doi.org/10.5777/ambiencia.2012.05.01rb>.
- CLAUDINO-SALES, V. **Megageomorfologia do Estado do Ceará.** São Paulo: Novas Edições Acadêmicas, 2016.
- FALCÃO, C. L. da C.; SILVA, J. R. C. Avaliação preliminar dos efeitos da erosão e de sistemas de manejo na produtividade de um Argissolo na serra da Meruoca - ceara. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, [S. l.], v. 4, n. 1, 2012. Disponível em: [//rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/64](http://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/64). Acesso em: 24 jul. 2025.
- DANTAS, M. E. et al. Origem das paisagens. In: BRANDÃO, Ricardo de Lima; Luis Carlos Bastos. **Geodiversidade do estado do Ceará.** Fortaleza: CPRM, 2014. Cap. 2. p. 37-58.
- DINIZ, S. F. **Caracterização fisiográfica e pedológica da região norte do estado do Ceará.** 2010. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.
- FALCÃO SOBRINHO, J. **O relevo o elemento e a âncora, na dinâmica da paisagem do vale, verde e cinza, do Acaraú, no Estado do Ceará.** 2006. 300 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- FERNANDES, A. **Temas Fitogeográficos.** Fortaleza: Stylus Comunicações, 1990.
- FERREIRA, F. L. S.; RODRIGUES, J. M. D.; LIMA, E. C. Feições graníticas no tanque da onça, vertente seca do maciço residual serra da Meruoca, Ceará, brasil. **Revista Equador**, Teresina, v. 12, n. 1, p. 142-155, jun. 2023.



Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos do Estado do Ceará** [livro eletrônico]. -- Fortaleza, CE : Coletivo Duas Catitas, 2024. ePub

KLAMT, E.; BEATTY, M. T.. Gênese duma sequência de solos da região do planalto médio Riograndense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 7, n. 6, p. 99-109, jan. 1972.

LEPSCH, I. F. et al. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 170 p.

LIMA, D. B. de. **Análise temporal da cobertura e uso da terra como subsídio ao estudo de degradação ambiental da serra da Meruoca - Ceará**. 2014. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2014.

LIMA, J. S. de. **Proposta de zoneamento geoambiental para a área de proteção ambiental serra da Meruoca, Ceará**. 2016. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2016.

LIMA, E. C.; CLAUDINO-SALES, V.; OLIVEIRA, U. C. de. Levantamento fisiográficos dos altos cursos das sub-bacias hidrográficas no maciço cristalino Serra da Meruoca, estado do Ceará. **Geografares**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 1-16, 31 mar. 2021. Disponível em: <https://journals.openedition.org/geografares/1255>. Acesso em: 23 maio 2024.

LIMA, D. B.; FREITAS FILHO, M. R. de. Análise do Índice de Vegetação Como Subsídio ao Estudo de Degradação Ambiental: O Caso da Serra da Meruoca-Ceará. **Geografia (Londrina)**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 91–105, 2015. DOI: 10.5433/2447-1747.2015v24n1p91. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/20247>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MENDES, M. V. R. **Relação solo/paisagem da serra da Meruoca/Ceará: potencialidade e susceptibilidade ambiental**. Dissertação apresentada ao Departamento de Geografia da Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA), 2020. 108 p. Sobral-CE.

MENDES, M. V. R. et al. Os solos no contexto da paisagem da serra da Meruoca, Ceará, Brasil. **Revista Territorium Terram**, São João Del-Rei, v. 4, n. 6, p. 146-169, 30 out. 2021.

MILNE, G.. Normal Erosion as a Factor in Soil Profile Development. *Nature*, [S.L.], v. 138, n. 3491, p. 548-549, set. 1936. **Springer Science and Business Media LLC**. <http://dx.doi.org/10.1038/138548c0>.

MOREIRA, M. M. M. A.; GATTO, L. C. S. Geomorfologia. In: Ministério das Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, p. 213-252. 1981.

PEREIRA, B. C. Relação solo-paisagem e sua aplicabilidade: uma ferramenta fundamental para o entendimento da caracterização da paisagem. **Cadernos do Leste**, Belo Horizonte, v. 20, n. 20, p. 1-14, jan./dez. 2020.

RODRIGUES, J. M. D. et al. Análise das paisagens da Serra da Meruoca a partir da relação solo-paisagem. In: CARACRISTI, I.; DINIZ, S. F.; MONTEIRO, J. B. (org.). **CLIMA, SOLOS E ÁGUA: O ambiente semiárido na pesquisa e na extensão desenvolvidas pelo Laboratório de Estudos Ambientais e Climáticos (LEAC/ UVA)**. Sobral: Sertão Cult, 2024.

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V. da; CAVALCANTI, A. de P. B. **Geoecologia das paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. 6. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2013.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SOUZA, M. M. A. **Análise climática e biogeográfica da Serra do Rosário, maciço residual da Serra da Meruoca, Sobral, Ceará**. 2024. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 2024.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em Mapas**. Governo do Estado do Ceará. Secretaria do Planejamento e Coordenação, 2010.



CROSTAS BIOLÓGICAS E A ESTABILIZAÇÃO DE TERRENOS AFETADOS POR EROSÃO NO MUNICÍPIO DE FLORESTA – SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Luana Bezerra dos Santos ¹

Isaias Duarte Nunes ²

Alissandra Trajano Nunes ³

Kleber Carvalho Lima ⁴

PALAVRAS-CHAVE: Biocrosta, Cianobactérias, Processos erosivos, Desertificação.

RESUMO

O ecossistema do semiárido é diverso, composto por associações ecológicas diversas, a exemplo da crosta biológicas do solo, formada por cianobactérias, fungos, líquens e criptogramas. Essa composição, também denominada biocrosta, desempenha papel fundamental na estabilização do solo, no controle da erosão e até mesmo na ciclagem de nutrientes. No entanto, sua destruição por pisoteio de animais, práticas agrícolas inadequadas ou mudanças climáticas, pode acelerar a degradação do solo e contribuir com a desertificação. Nesta pesquisa, objetivou-se avaliar a composição de biocrostas presentes em setores degradados por erosão e o seu potencial na estabilização dos terrenos e na retenção de umidade no solo. A investigação foi realizada em área experimental localizada no município de Floresta, semiárido pernambucano, em setores com suscetibilidade severa a desertificação. Foram tomadas amostras nas estações secas e chuvosas dos anos de 2023 e 2024, respectivamente, em diferentes pontos do terreno. As amostras foram coletadas com espátula estéril, armazenadas em sacos plásticos estéreis e encaminhadas ao laboratório para análise da composição macro e microbiológica. Como resultado, foram identificadas espécies de briófitas da família Pottiaceae, Pteridófitas, *Selaginella sellowii* Hieron, *Selaginella convoluta* e cianobactérias. A presença das espécies representativas da família Selaginellaceae podem estar associadas à capacidade de colonizar solos degradados, já que são conhecidas por sua resistência a condições ambientais extremas, como seca e calor intenso. A presença de cianobactérias atua como agente agregador de partículas do solo, pois facilita a fixação e estabilização, reduzindo a erosão nos trechos com biocrostas. O estudo sugere que nos terrenos com crostas biológicas, a infiltração da água e a retenção de umidade são facilitadas pois aumentam a porosidade do solo e podem contribuir com a redução do escoamento superficial e erosão. Além disso, a presença de cianobactérias permite a fixação de nitrogênio atmosférico, enriquecendo o solo e criando condições favoráveis para o crescimento de plantas. A estabilização do solo proporcionada pela biocrosta favorece ainda a sucessão ecológica, permitindo o estabelecimento de vegetação pioneira, que contribui para a recuperação da paisagem e a mitigação da erosão e desertificação a longo prazo.

¹ Mestranda do PPGSDS da Universidade de Pernambuco - UPE, luana.bezerrasantos@upe.br

² Graduando pelo Curso de Geografia da Universidade de Pernambuco – UPE, isaias.nunes@upe.br

³ Doutora do Curso de C. Biológicas da Universidade de Pernambuco – UPE, alissandra.nunes@upe.br

⁴ Doutor do Curso de Geografia da Universidade de Pernambuco – UPE, kleber.carvalho@upe.br



INTRODUÇÃO

A erosão representa um dos principais desafios ambientais enfrentados nas regiões semiáridas do Brasil, com destaque para o Sertão de Pernambuco. Esse fenômeno é impulsionado pela interação entre fatores naturais, como baixa pluviosidade e altas taxas de evaporação, e atividades humanas insustentáveis, como desmatamento, sobrepastoreio, queimadas e uso inadequado do solo (PIVETTA, 2024). Como resultado, a degradação progressiva do solo tem comprometido serviços ecossistêmicos essenciais, como a retenção hídrica, a ciclagem de nutrientes e a estabilidade estrutural do terreno, impactando negativamente a produtividade agrícola e a qualidade de vida das populações locais.

Nesse contexto, as crostas biológicas do solo (CBS), também chamadas de biocrostas, despontam como elementos-chave para a manutenção da integridade dos solos em regiões secas. Formadas por associações de microrganismos fotossintetizantes e não fotossintetizantes, como cianobactérias, algas verdes, fungos, líquens, musgos e pequenas plantas vasculares, essas crostas compõem uma camada superficial biologicamente ativa (BELNAP *et al.*, 2001). Diversos estudos recentes ressaltam a importância ecológica das CBS na estabilização física do solo, retenção de umidade, fixação de nitrogênio atmosférico, prevenção da erosão e suporte à sucessão ecológica (SZYJA *et al.*, 2019).

Apesar de sua relevância, as crostas biológicas do solo ainda são frequentemente ignoradas em políticas e estratégias de manejo ambiental. A destruição dessas formações, provocada por práticas inadequadas como a aração intensa, o uso de maquinário pesado e o pisoteio de animais, compromete seriamente a funcionalidade do solo, acelerando a degradação e favorecendo o avanço da desertificação (SILVA, 2020). A perda da cobertura biológica reduz a infiltração de água, intensifica o escoamento superficial e facilita o transporte de sedimentos, ocasionando erosão severa e perda de fertilidade.

Essas características são particularmente perceptíveis no município de Floresta, localizado no semiárido pernambucano, onde a suscetibilidade à desertificação é elevada e a erosão, recorrente. Assim, esta pesquisa, objetivou avaliar a composição de biocrostas presentes em setores degradados por erosão e o seu potencial na estabilização dos terrenos e na retenção de umidade no solo.

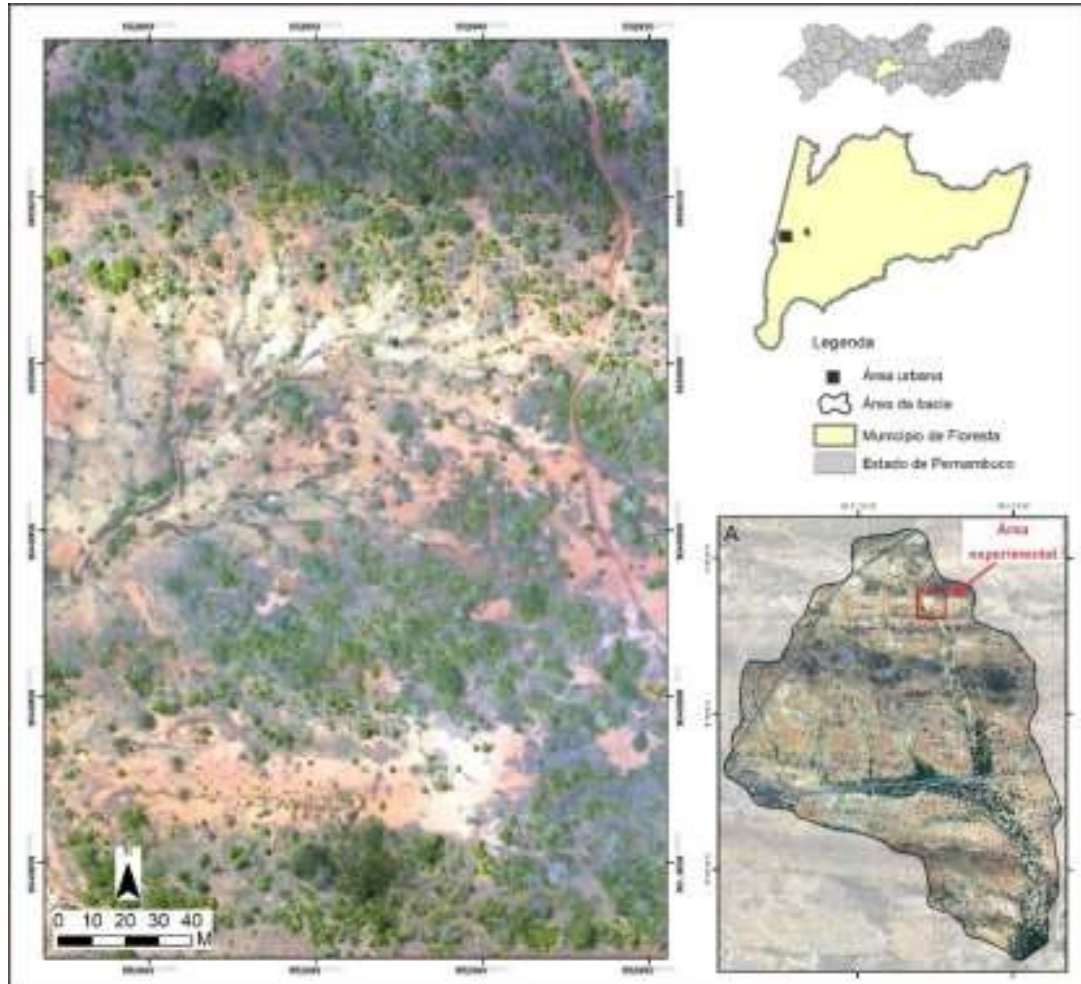
Acredita-se que as alterações nas condições ambientais globais possam afetar os ecossistemas terrestres, incluindo as comunidades de biocrostas (LIMA *et al.*, 2021). Dessa forma, é possível que as crostas biológicas tenham organismos indicadores de solos degradados, sendo necessário o desenvolvimento de estudos que se concentrem em investigar a diversidade de organismos formadores de biocrosta.



MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um sistema erosivo, previamente estudado por Lima *et al.* (2023) e Lima; Nunes e Lupinacci (2024), situado em área degradada da bacia hidrográfica do riacho Floresta, município de Floresta, semiárido de Pernambuco (Figura 1).

FIGURA 1: Mapa de localização do sistema erosivo na Bacia Hidrográfica do riacho Floresta.



FONTE: Os autores (2025).

A área está localizada na Depressão Sertaneja (IBGE, 2023), cujo clima regional, segundo Köppen, é do tipo Bwh (semiárido), quente e seco, com chuvas concentradas entre o verão e o outono. A precipitação média anual é de aproximadamente 400 mm e temperatura média anual de 26,1° C (IBGE, 2023).

Os solos predominantes são os Luvisolos Crômicos, que apresentam gradiente textural abrupto entre os horizontes A (arenosos) e B (argilosos), geralmente recobertos por pavimento detrítico, muitos suscetíveis a erosão. A vegetação é típica de caatinga hiperxerófila, pouco densa e arbustiva, o que expõe o solo ao impacto direto à erosão.

As crostas biológicas foram coletadas nas estações secas e chuvosas em diferentes pontos do sistema erosivo. Para se compreender a sua distribuição espacial, foram



realizados sobrevoos com auxílio de drone DJI Air 2S em duas alturas: 60 metros, para o recobrimento total do sistema e com 10 metros para identificação macroscópica da biocrosta nos setores de ocorrência.

Nas áreas de ocorrência, as amostras foram coletadas com uma espátula estéril, armazenadas em sacos plásticos estéreis e encaminhadas ao Laboratório de Ecologia, Botânica e Etnobiologia (LEBE), da Universidade de Pernambuco, campus de Garanhuns, para análise do material coletado.

Para análise microbiológica, as amostras foram selecionadas de acordo com o seu maior grau de preservação. Em seguida, foi realizado o isolamento do solo da amostra contendo a biocrosta, onde foi adicionada água destilada para maceração com espátula em placa de petri. Com auxílio de pipeta, foi retirada uma alíquota de cada amostra e realizado o segundo isolamento (Figura 2-A e B), até que o meio estivesse livre de fragmentos de solo. Posteriormente, foi preparado o meio de cultura AMS1 em tubos de ensaio para a identificação das cianobactérias presentes nas amostras.

Após o isolamento (Figura 2-C), foi realizada a identificação e caracterização de elementos como cor, formato, presença ou não de ramificação e segmento. As amostras ficaram em estufa por 30 dias e, após esse período, houve o crescimento de 3 das 7 amostras, sendo feita, posteriormente, a primeira replicação das amostras que cresceram no tubo de ensaio (Figura 2-D).

FIGURA 2: Imagens microscópicas de cianobactérias com fragmentos de solo, em processo de isolamento (A e B); cianobactéria isolada (C); em crescimento (D).



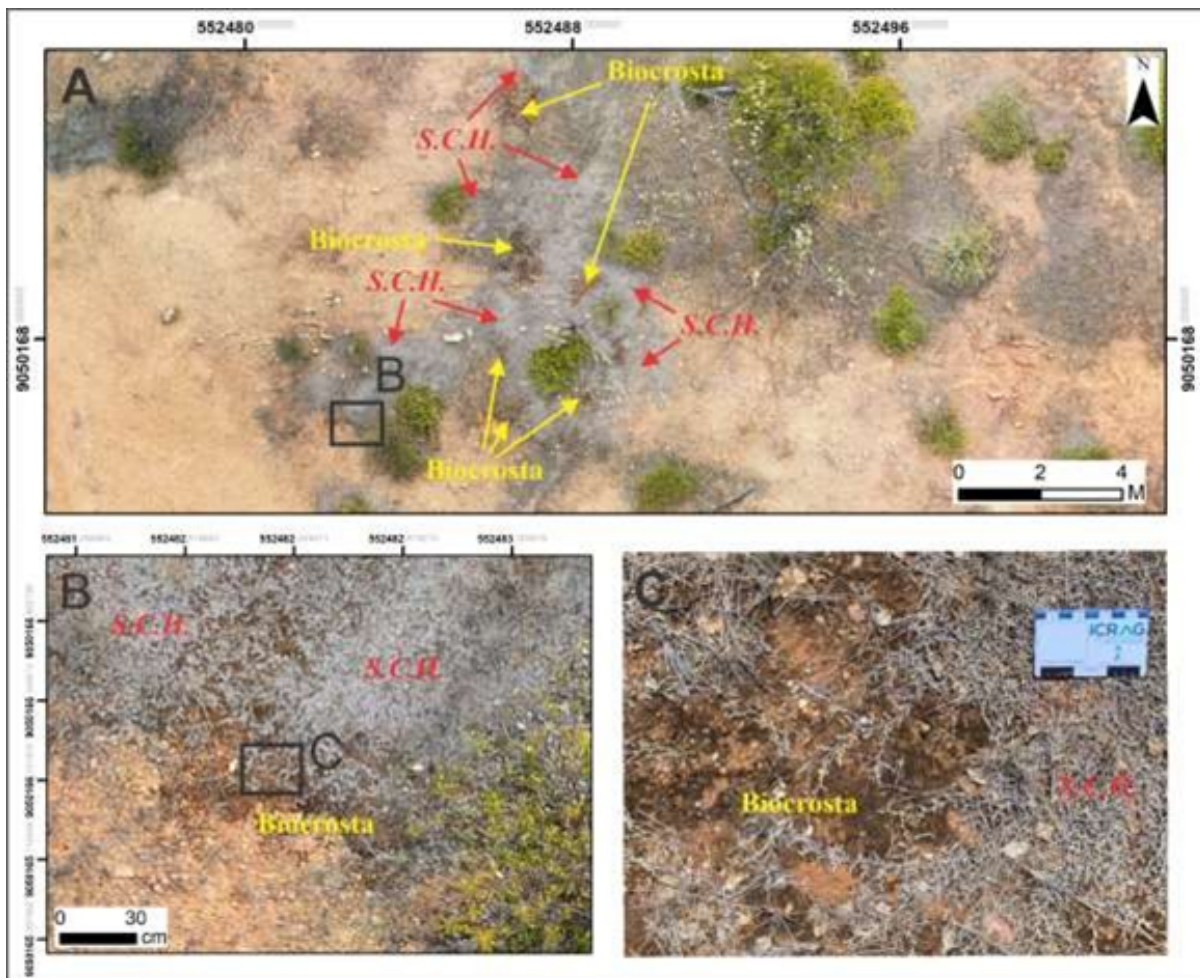
FONTE: Os autores (2024).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área de estudo, as crostas biológicas ocorrem de maneira fragmentada, em setores onde há presença de vegetação e quase sempre associada a ocorrência da espécie *Selaginella sellowii* Hieron (Figura 3). Em menor quantidade, ocorre associada a espécie *Selaginella convoluta* (Arn.) Spring, ambas pertencentes ao grupo das Pteridófitas. Nas imagens feitas com drone em altura de 10 metros, foi possível identificar *S. sellowii* Hieron em função da sua tonalidade cinza claro no período seco (Figura 3-A). A Biocrosta, por sua vez, foi identificada a partir das imagens inseridas em software de SIG, em escala 1:20 (Figura 3-B), bem como nos trabalhos de campo (C).

FIGURA 3: Setor representativo com ocorrência de *Selaginella sellowii* Hieron – S.S.H. e biocrosta: associações com vegetação entre solo exposto (A); S.S.H. e biocrosta em imagem de drone - escala 1:20 (B); e S.S.H.-biocrosta em fotografia de campo. (C).



FONTE: Os autores (2024).

As amostras coletadas apresentaram em sua composição macro a presença de Briófitas e dois representantes da família *Selaginellaceae* pertencentes a um único gênero *Selaginella*, um dos mais diversificados da família com cerca de 46 espécies no Brasil (ALSTON *et al.*, 1981). Sendo as representantes *S. sellowii* (Figura 4–A), classificadas como



terrícolas ou rupícolas e *S. convoluta* (Figura 4-B) de hábito terrestre (FORZZA, 2010). Ambas, são frequentes em caatinga (BARRO, LIRA E SILVA, 1988). Também consideradas xerófilas por suportarem secas extremas e alta adaptação ecológica, denominada por — planta de ressurreição, por terem aparência de mortas (ressecadas) na estação seca, recuperando total ciclo de vida na estação chuvosa (POTSHE E ARENS, 2021).

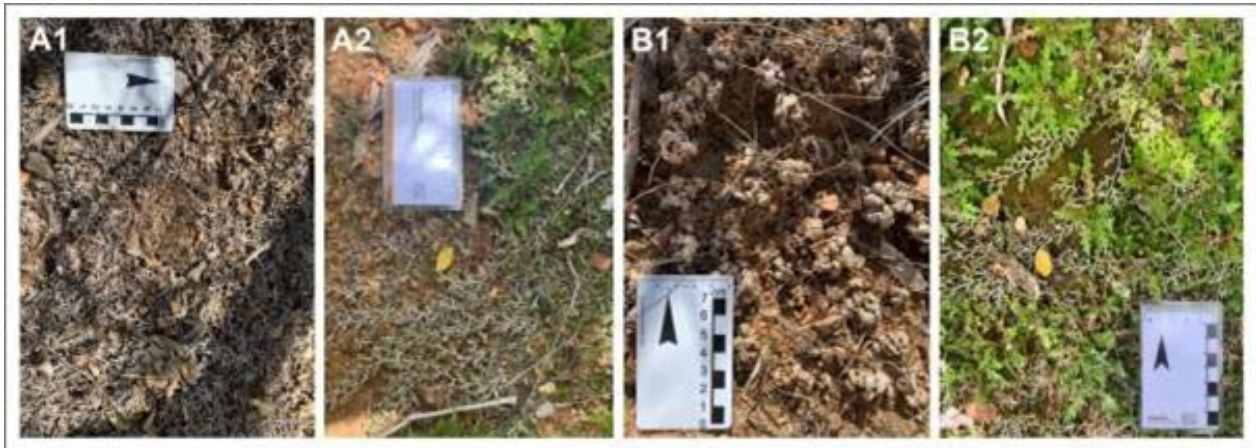
Segundo Oliveira (2023), a presença de *S. sellowii* e *S. convoluta* em áreas com biocrosta sugere que as espécies podem se relacionar com esse micro-habitat, caracterizados por diferentes níveis de umidade e estabilidade, especialmente em solos secos. As duas espécies encontradas na área de estudo demonstram notável tolerância à dessecação (Figura 4- A1 e B1), o que possibilita a esta espécie suportar extensos períodos em estado desidratado (OLIVEIRA E MORAES, 2015). Tal tolerância inclui ainda a habilidade de restabelecer suas funções fisiológicas (Figura 1-B1 e B2), após a perda total de água decorrente de prolongados episódios de seca (BONFIM, 2023).

(Couto *et al.*, 2021) consideraram *S. sellowii* como uma planta útil na restauração de ambientes degradados, sendo denominada —espécie enfermeira” dado ao seu papel ecológico constatado em um estudo realizado pelos autores. Essa função pode ser atribuída pela forma como a espécie se insere no solo, ramificando os rizóforos pela superfície do solo e adentrando na camada superficial, criam uma camada protetora, quando as partes mais velhas perdem a sua função fisiológica (morrem) se transformam em humus, proporcionando matéria orgânica ajudando que outras espécies se fixem na superfície, como as briófitas encontradas. Situação semelhante foram observadas nos trabalhos de Couto *et al.* (2021) e Potshe e Arens (2021) o que sugere o forte papel dessas espécies na proteção do solo.

No local amostrado foi encontrado um indivíduo de Briófitas da família Pottiaceae, o grupo taxonômico é composto por plantas terrestres, criptogâmicas, com alternância heteromórfica de gerações (Gradstein *et al.*, 2001). São predominantemente terrestres, com estreita dependência com a água para reprodução sexuada, visto que os gametas masculinos são flagelados (Costa *et al.*, 2010). A família Pottiaceae, possui mais de 1.400 indivíduos, sendo a mais diversa dos Musgos, comum em ambientes úmidos (Crosby MR, Magill RE, Allen B, He S. 1999. A Checklist of the Mosses. St. Louis, Missouri Botanical Garden.) o que reforça a sua presença condicionada pelas Selagillas.



FIGURA 4: *Selaginella sellowii* Hieron nas estações secas e chuvosa (A1 e A2); *Selaginella convoluta*



FONTE: Os autores (2024).

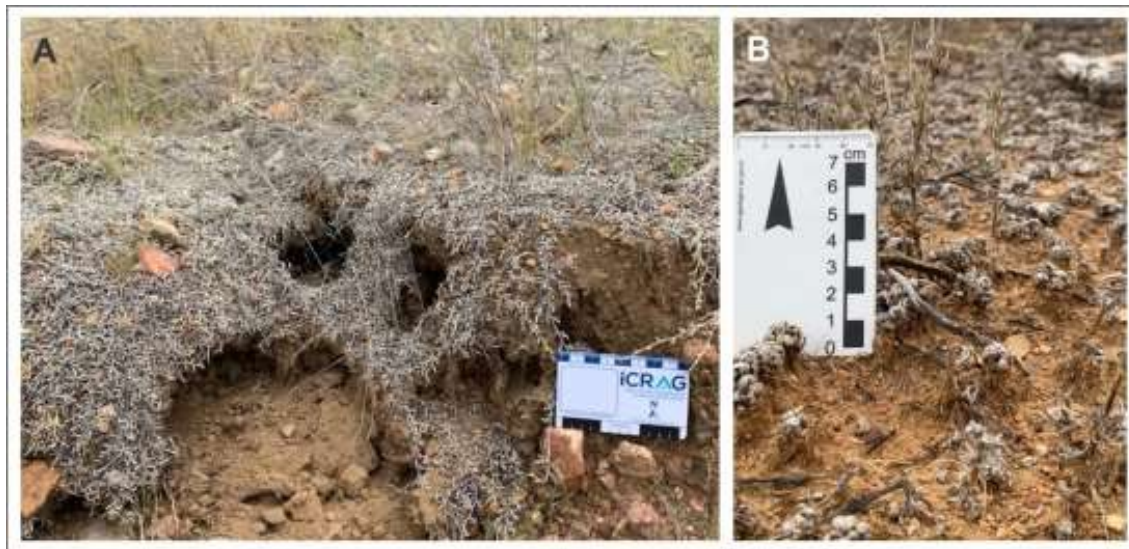
Outro grupo encontrado no ambiente, foram as cianobactérias, organismos procarióticos capazes de fixar carbono através da fotossíntese, fazendo parte da comunidade fitoplanctônica e contribuindo, deste modo, com grande parte da produtividade primária e do fluxo de energia em ecossistemas eutrofizados. Estes organismos, entretanto, são também capazes de sintetizar uma série de compostos secundários, com efeitos biológicos tóxicos, chamados de cianotoxinas (Carmichael, 1992). A fixação de nitrogênio pelas cianobactérias enriquece o solo e facilita o surgimento de plantas pioneiras, impulsionando a sucessão ecológica, além de contribuírem no controle da erosão, ciclagem de nutrientes e dinâmica da água no solo (FERREIRA *et al.*, 2025).

A partir disso, infere-se que as crostas biológicas apresentam importância para a retenção de umidade no solo em períodos de seca, aumentando a sua porosidade e facilitando a infiltração da água, possibilitando a regeneração da vegetação nativa. A biocrosta, formada por microrganismos, como bactérias, fungos e algas, e matéria orgânica, pode agir como camada protetora do terreno, aumentando a agregação do solo, reduzindo a infiltração da água e diminuindo o impacto direto das gotas de chuva e do vento, reduzindo a erosão (Cooke; Doornkamp, 1990).

Por outro lado, foram identificados setores na área estudada que sinalizam para a perda de biocrosta, o que, segundo Phillips *et al.* (2022), pode indicar processos de degradação e avanço da desertificação associados a mudanças climáticas. Nesses setores foram observadas a remoção de *Selaginella sellowii* Hieron e exposição de raízes de *Selaginella convoluta* (Arn.) Spring, formando pequenos pedestais (Figura 6). Uma vez que as duas espécies só ocorrem associadas a crostas biológicas na área de estudo, aponta-se para o avanço da erosão e conseqüente redução das crostas.



FIGURA 6: Erosão do solo em camada subsuperficial à biocrosta com retenção parcial dos agregados por meio das raízes de *S. sellowii* (A); Erosão laminar com remoção de biocrosta e formação de pedestais em *S. convoluta*



FONTE: Os autores (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa evidenciou a relevância ecológica das crostas biológicas do solo (CBS) como elementos fundamentais na estabilização e recuperação de áreas degradadas por erosão no semiárido pernambucano, com destaque para o município de Floresta. As análises realizadas ao longo das estações seca e chuvosa demonstraram que essas formações, compostas por cianobactérias, fungos, líquens e plantas pioneiras, como as do gênero *Selaginella*, exercem múltiplas funções ecológicas cruciais para a conservação dos solos.

Dentre os principais resultados, destaca-se a capacidade das cianobactérias em promover a agregação das partículas do solo por meio da produção de substâncias mucilaginosas, o que contribui significativamente para a coesão e resistência do solo à erosão hídrica. Paralelamente, as CBS atuam como barreiras naturais que reduzem o impacto direto da chuva e o escoamento superficial, fortalecendo a estrutura do solo em ambientes suscetíveis à desertificação.

Conclui-se, portanto, que a conservação e o manejo adequado das crostas biológicas do solo configuram uma estratégia eficiente, de baixo custo e ecologicamente viável para mitigar os efeitos da desertificação e promover a sustentabilidade no semiárido. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem o conhecimento sobre a resiliência dessas comunidades frente às mudanças climáticas e pressões humanas, visando à preservação dos ecossistemas e à melhoria das condições de vida das populações que dependem desses ambientes.



A utilização e o fortalecimento das crostas biológicas do solo podem oferecer uma estratégia viável para restaurar áreas degradadas, promovendo a estabilidade física do solo, a recuperação da cobertura vegetal e a melhoria das condições microclimáticas.

Assim, a presente pesquisa fornece dados de base para estudos sobre processos erosivos e a relevância das crostas biológicas do solo (CBS) como potenciais indicadores de regeneração em áreas degradadas da Caatinga, com foco no município de Floresta, no semiárido pernambucano.

O trabalho ainda destaca a importância das CBS no contexto ecológico da Caatinga, por suas funções na estabilização do solo, controle da erosão, ciclagem de nutrientes e regeneração dos solos degradados. A sugere que as crostas biológicas encontradas no município de Floresta atuam como bioindicadores de solos degradados, sendo necessárias pesquisas para investigar a diversidade e o papel desses organismos em ambientes semiáridos.

REFERÊNCIAS

- ALSTON, A. H. G.; JERMY, A. C.; RANKIN, J. M. The genus *Selaginella* in tropical South America. *Bulletin of the British Museum (Natural History) Botany*, v. 9, p. 233–330, 1981.
- ANDRADE-LIMA, D. The caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 4, p. 149–163, 1981.
- BELNAP, J. et al. *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*. Denver, Colorado: USDI/BLM - US Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Science and Technology Center, 2001.
- BELNAP, J.; GILLETTE, D. A. Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in Southeastern Utah. *Land Degradation and Development*, v. 8, n. 4, p. 355–362, 1997.
- BONFIM, I. Caracterização química de *Selaginella sellowii* Hieron. (Selaginellaceae) e atividades antileishmania, antibiofilme e antibacteriana. 2023. 93 f. Dissertação (Mestrado)
- Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Ciências Farmacêuticas Alimento e Nutrição, Campo Grande, 2023.
- BOWKER, M. A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity. *Restoration Ecology*, v. 15, n. 1, p. 13–23, 2007.
- CANTÓN, Y. et al. Dynamics of organic carbon losses by water erosion after biocrust removal. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 62, n. 4, p. 258–268, 2014.
- CARMICHAEL, W. W. Cyanobacteria secondary metabolites: the cyanotoxins. *Applied Bacteriology*, v. 72, p. 445–454, 1992.
- CASTELETI, C. H.; SILVA, J. M. C.; SANTOS, A.; TABARELLI, M. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. *Avaliação e Identificação de Ações Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade do Caatinga*, 2000.
- COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. *Geomorphology in environmental management*. Oxford: Clarendon, 1990.
- COSTA, D. P. et al. *Manual de Briologia*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 222 p. DOI: 10.34117/bjdv6n1-085.
- COUTO, D. R. et al. Floristic composition, structure and species-area relationships on a neotropical inselberg in southeastern Brazil. *Rodriguésia*, v. 72, p. e00872020, 2021.



- DOJANI, S. et al. Rapid succession of biological soil crusts after experimental disturbance in the Succulent Karoo, South Africa. *Applied Soil Ecology*, v. 48, n. 3, p. 263–269, 2011.
- FAO; ITPS; GSBI; CBD; EC. State of knowledge of soil biodiversity – Status, challenges and potentialities. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb1928en/cb1928en.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2023.
- FERREIRA, V. C. R. et al. Distinct responses of *Scytonema hyalinum* and *Leptolyngbya* sp. to water availability and biocrust formation. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 56, p.1263–1275, 2025.
- FORZZA, R. C. et al. Catálogo de plantas e fungos do Brasil. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio; Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, v. 2, 2010.
- GARCIA-PICHEL, F. et al. Small-scale vertical distribution of bacterial biomass and diversity in biological soil crusts from arid lands in the Colorado Plateau. *Microbial Ecology*, v. 46, n. 3, p. 312–321, 2003.
- GIULIETTI, A. M. et al. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma da Caatinga. In: Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. Brasília, 2006.
- GLIME, J. M. Conheça as Briófitas. Cap. 2-1. In: GLIME, J. M. (Org.). *Ecologia de Briófitas*. v. 1. *Ecologia Fisiológica*. 2013. Ebook patrocinado pela Michigan Technological University e pela International Association of Bryologists.
- GRADSTEIN, S. R.; CHURCHILL, S. P.; SALAZAR-ALLEN, N. Guide to the Bryophytes of Tropical America. *Memoirs of the New York Botanical Garden*, v. 86, p. 1– 577, 2001.
- HARPER, K. T.; BELNAP, J. The influence of biological soil crusts on mineral uptake by associated vascular plants. *Journal of Arid Environments*, v. 47, n. 3, p. 347–357, 2001.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/floresta/panorama>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- LEAL, R. I.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. *Ecologia e Conservação da Caatinga*. 2. ed. 2005. p. 23.
- LIMA, K. C. et al. Erosão em áreas suscetíveis a desertificação no Semiárido: possibilidades de análise por meio da cartografia geomorfológica baseada em imagens de altíssima resolução. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 2, 2023.
- LIMA, N. M. M. et al. Biocrust cyanobacterial composition, diversity, and environmental drivers in two contrasting climatic regions in Brazil. *Geoderma*, v. 386, n. 15, p. 114914, 2021.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; IBAMA. *Caatinga: Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite*. 2017. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80120/HEX_RelatorioBiomaCaatinga_2010-2011_V2%20-%20MMA.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.
- OLIVEIRA, A. A. Q.; MORAES, M. G. Dehydration and rehydration in *Selaginella sellowii* Hieron. aerial parts, a desiccation tolerant species. *Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão*, v. 37, n. 4, p. 393–493, 2015.
- PARENTE, H. N.; MAIA, M. O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. *Revista Trópica: Ciências Agrárias*, v. 5, n. 3, p. 3–15, 2011.
- PHILLIPS, M. L. et al. Biocrusts mediate a new mechanism for land degradation under a changing climate. *Nature Climate Change*, v. 12, p. 71–76, 2022.
- PIMENTEL, D.; KOUNANG, N. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, v. 1, n. 5, p. 416–426, 1998.
- RAANAN, H. et al. Three-dimensional structure and cyanobacterial activity within a desert biological soil crust. *Environmental Microbiology*, v. 18, n. 2, p. 372–383, 2016.
- RODAL, M. J. W. *Fitossociologia da vegetação arbustivo-arbórea em quatro áreas de caatinga em Pernambuco*. 1992. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1992.
- ROSSI, F. et al. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 28–43, 2017.
- SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (Org.). *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 35–58.



- SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. S. B. Desertificação no nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30., 2005, Recife. Anais [...]. Recife: UFPE/SBCS, 2005a.
- SAMPAIO, E. S. B. Caracterização do Bioma Caatinga: características e potencialidades. In: GARIGLIO, M. A. et al. (Org.). Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. p. 368.
- SILVA, A. K. O. Manejos e impactos do uso do solo em áreas degradadas no município de Cabrobó (PE). 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10725/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20An drezza%20Karla%20de%20Oliveira%20Silva.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10725/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20An%20drezza%20Karla%20de%20Oliveira%20Silva.pdf). Acesso em: 26 jul. 2025.
- SILVA, F. B. R. et al. Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1993. 2 v. + mapa.
- SILVEIRA, H. L. F. et al. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, n. 73, p. 179–190, 2018.
- SMITH, W. K. et al. Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: Progress, challenges, and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, v. 233, p. 111401, 2019.
- SZYJA, M. et al. Neglected but potent dry forest players: Ecological role and ecosystem service provision of biological soil crusts in the human-modified Caatinga. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 7, p. 482, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2019.00482/full>. Acesso em: 26 jul. 2025.
- PIVETTA, M.; FONTANETTO, R. Um Brasil mais seco. *Pesquisa FAPESP*, São Paulo, ed. 338, p. 20–21 (parte 2), abr. 2024. Disponível em: [https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2024/04/020-021_ capa-Brasil-mais-seco_338-parte-2.pdf](https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2024/04/020-021_capa-Brasil-mais-seco_338-parte-2.pdf). Acesso em: 27 jul. 2025.